

**Kompostierte Gärreste aus Bioabfällen als Düngestoffe:  
Bodenökologische und pflanzenbauliche Wirkungen**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doctor rerum agriculturalarum  
(Dr. rer. agr.)

eingereicht an der  
Lebenswissenschaftlichen Fakultät  
der Humboldt-Universität zu Berlin

von

M. Sc. Christina-Luise Roß

Präsidentin der Humboldt-Universität zu Berlin: Prof. Dr.-Ing. Dr. Sabine Kunst  
Dekan der Lebenswissenschaftlichen Fakultät: Prof. Dr. Bernhard Grimm

Gutachter

1. Prof. Dr. Dr. h. c. Frank Ellmer
2. Prof. Dr. Christof Engels
3. Dr. Wilfried Zorn

Tag der mündlichen Prüfung: 01.12.2017

# Inhalt

|   |            |
|---|------------|
| <b>Abbildungsverzeichnis .....</b>  | <b>III</b> |
| <b>Tabellenverzeichnis .....</b>  | <b>IV</b>  |
| <b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>  | <b>X</b>   |
| <b>Zusammenfassung.....</b>   | <b>XI</b>  |
| <b>Abstract .....</b>   | <b>XII</b> |
| <b>1. Einleitung .....</b>  | <b>1</b>   |
| 1.1 Definitionen.....   | 3          |
| 1.2 Situation in Deutschland.....   | 4          |
| 1.2.1 Vergärung und Nachbehandlung der Feststoffe .....   | 5          |
| 1.2.2 Pelletierung bzw. Agglomeration von Gärresten und Komposten .....   | 7          |
| 1.2.3 Wertgebende Eigenschaften .....   | 9          |
| 1.2.4 Probleme .....  | 11         |
| <b>2. Beschreibung der Gärprodukte und ihrer Weiterentwicklung .....</b>  | <b>14</b>  |
| <b>3. Wirkungen von kompostierten Gärprodukten aus Bioabfällen auf bodenökologische<br/>    Parameter sowie auf Wachstum, Entwicklung und Ertragsbildung von<br/>    Kulturpflanzen .....</b> | <b>22</b>  |
| 3.1 Kohlenstoffmineralisierung .....  | 22         |
| 3.1.1 Zielstellung .....  | 23         |
| 3.1.2 Material und Methoden.....  | 23         |
| 3.1.3 Ergebnisse und Diskussion.....  | 25         |
| 3.1.4 Schlussfolgerungen.....   | 29         |
| 3.2 Wirkungen der Gärprodukte auf Regenwürmer in Labor und Freiland .....   | 30         |
| 3.2.1 Zielstellung .....  | 31         |
| 3.2.2 Vermeidungstests.....   | 33         |
| 3.2.2.1 Material und Methoden.....  | 33         |
| 3.2.2.2 Ergebnisse und Diskussion .....   | 37         |
| 3.2.3 Regenwurmart und -abundanz im Feldversuch .....   | 45         |
| 3.2.3.1 Material und Methoden.....  | 45         |
| 3.2.3.2 Ergebnisse und Diskussion .....   | 45         |

|   |              |
|---|--------------|
| 3.2.4 Schlussfolgerungen .....  | 47           |
| 3.3 Einfluss der Gärprodukte auf Wurzelmorphologie und bodenchemische Parameter .....                                 | 48           |
| 3.3.1 Zielstellung .....  | 48           |
| 3.3.2 Material und Methoden.....  | 49           |
| 3.3.3 Ergebnisse und Diskussion .....   | 51           |
| 3.3.3.1 Auswirkungen auf die Bodeneigenschaften .....   | 51           |
| 3.3.3.2 Auswirkungen auf die Wurzelmorphologie und das Sprosswachstum .....   | 52           |
| 3.3.4 Schlussfolgerungen .....  | 55           |
| 3.4 Phytotoxische Wirkungen der Gärprodukte .....   | 56           |
| 3.4.1 Zielstellung .....  | 56           |
| 3.4.2 Material und Methoden.....  | 56           |
| 3.4.3 Ergebnisse und Diskussion .....   | 59           |
| 3.4.4 Schlussfolgerungen .....  | 66           |
| 3.5 Wirkungen der Gärprodukte auf Biomassebildung und bodenchemische Parameter unter kontrollierten Bedingungen ..... | 67           |
| 3.5.1 Zielstellung .....  | 67           |
| 3.5.2 Material und Methoden.....  | 67           |
| 3.5.3 Ergebnisse und Diskussion .....   | 72           |
| 3.5.4 Schlussfolgerungen .....  | 96           |
| 3.6. Ackerbauliche Wirkungen im Freiland.....   | 98           |
| 3.6.1 Zielstellung .....  | 98           |
| 3.6.2 Material und Methoden.....  | 99           |
| 3.6.3 Ergebnisse und Diskussion .....   | 104          |
| 3.6.3.1 Wirkungen der Gärprodukte auf den Boden .....   | 104          |
| 3.6.3.2 Wirkungen der Gärprodukte auf Kulturpflanzen.....   | 111          |
| 3.6.3.3 Schwermetalle .....   | 120          |
| 3.6.4 Schlussfolgerungen .....  | 124          |
| <b>4. Gesamtbewertung .....</b>   | <b>126</b>   |
| <b>Literaturverzeichnis .....</b>   | <b>131</b>   |
| <b>Anhang .....</b>   | <b>CXLII</b> |
| <b>Danksagung .....</b>   | <b>CLVII</b> |

## Abbildungsverzeichnis

|               |   |    |
|---------------|---|----|
| Abbildung 1:  | Schematische Darstellung des diskontinuierlichen Trockenfermentationsverfahrens mit Perkolation der Firma GICON GmbH (nach Raussen und Kern, 2014) .....  | 14 |
| Abbildung 2:  | Aufbereitete Gärprodukte (F = Feinfraktion, P = Pellet, A = Agglomerate, G = Grobfraktion) [Foto: Roß] .....  | 15 |
| Abbildung 3:  | Weiterentwickelte Gärprodukte - Agglomerate aus Gärresten aus Bioabfällen (=„AggloGr“) mit den Zuschlagstoffen Kalkammonsalpeter (= „KAS“), Tiermehl (= „TM“), Ton und Stroh [Foto: Roß] .....  | 20 |
| Abbildung 4:  | Aufbau der Gefäße im CarbO <sub>2</sub> Bot® .....  | 23 |
| Abbildung 5:  | Kumulierte CO <sub>2</sub> -Freisetzung je Gramm Boden in den drei Bodenatmungsversuchen .....  | 27 |
| Abbildung 6:  | Durch Gärprodukt-Aufnahme dunkel gefärbte Regenwurmlosung in einer Parzelle mit Feinfraktion (oben) bzw. Pellets (unten) im Herbst 2015 .....   | 32 |
| Abbildung 7:  | Gärprodukt in pelletierter Form mit Regenwurm ( <i>Eisenia fetida</i> ) nach Versuchsende [Foto: Roß] .....   | 33 |
| Abbildung 8:  | Ansatz des Regenwurmvermeidungstests. Testbehälter mit 10 frisch eingesetzten Regenwürmern ( <i>Eisenia fetida</i> ) [Foto: Roß] .....  | 34 |
| Abbildung 9:  | Entnahme von Boden (links) und Austrieb von tiefgrabenden Regenwurmart mit Allyl-Isouthiocyanat (rechts) im Feldversuch im Jahr 2015 .....  | 45 |
| Abbildung 10: | Schematische Darstellung der verwendeten Rhizoboxen (Reibe <i>et al.</i> , 2014) .....  | 50 |
| Abbildung 11: | Wurzelaufnahmen für die spätere Analyse mit der WinRHIZO-Software. Beispiele mit Pellet (links) und Feinfraktion (rechts) aus der dritten Ernte 2015 [Fotos: Roß] .....   | 50 |
| Abbildung 12: | Aufbau des Phytotoxizitätstests mit Hafer im Klimaschrank .....   | 57 |
| Abbildung 13: | Vergleich von Hafer im Phytotoxizitätstest mit Pellets (oben) und Agglomeraten der Kategorie 2 (unten). Produktmenge je Gefäß aufsteigend von links (entsprechend 0 kg ha <sup>-1</sup> N) nach rechts (entsprechend 900 kg ha <sup>-1</sup> N) ..... | 65 |
| Abbildung 14: | Messung der Blattfarbe von Raps mit dem YARA-N-Tester [Foto: Roß] .....   | 69 |
| Abbildung 15: | Messgerät für die Bestimmung der Blattfläche (links) mit Anzeige der Messwerte in cm <sup>2</sup> (rechts) [Foto: Herbst/Roß] .....   | 70 |



|               |   |     |
|---------------|---|-----|
| Abbildung 16: | Entwicklung der Wuchshöhe bei Hafer im Jahr 2015 in den Varianten mit 3 g Gefäß <sup>-1</sup> N .....   | 72  |
| Abbildung 17: | Entwicklung des Blattgrüns bei Hafer im Jahr 2015 in den Varianten mit 1 g Gefäß <sup>-1</sup> N .....  | 73  |
| Abbildung 18: | Entwicklung des Blattgrüns bei Hafer im Jahr 2015 in den Varianten mit 3 g Gefäß <sup>-1</sup> N .....  | 73  |
| Abbildung 19: | Entwicklung der Wuchshöhe von Hafer im Gefäßversuch 2016 .....  | 81  |
| Abbildung 20: | Entwicklung des Blattgrüns bei Hafer im Gefäßversuch 2016 .....   | 82  |
| Abbildung 21: | Haferpflanzen jeweils ca. acht Wochen nach der Aussaat im Gefäßversuch 2015 (oben, Varianten mit 3 g Gefäß <sup>-1</sup> N) und 2016 (unten).....   | 82  |
| Abbildung 22: | Entwicklung des Blattgrüns von Raps im Jahr 2015 in den Varianten mit 1 g Gefäß <sup>-1</sup> N .....   | 87  |
| Abbildung 23: | Entwicklung des Blattgrüns von Raps im Jahr 2015 in den Varianten mit 3 g Gefäß <sup>-1</sup> N .....   | 88  |
| Abbildung 24: | Rapspflanzen jeweils ca. 11 Wochen nach der Aussaat im Gefäßversuch 2015 (oben, Varianten mit 3 g Gefäß <sup>-1</sup> N) und 2016 (unten, Varianten mit Gärprodukten der Kategorie 2) [Foto: Roß] ..... | 92  |
| Abbildung 25: | Entwicklung der Wuchshöhe bei Raps im Gefäßversuch 2016. Abweichende Entwicklungsverläufe der Varianten (BBCH-Stadien) sind durch * markiert.....   | 93  |
| Abbildung 26: | Entwicklung des Blattgrüns bei Raps im Gefäßversuch 2016. Abweichende Entwicklungsverläufe der Varianten (BBCH-Stadien) sind durch * markiert. ....   | 93  |
| Abbildung 27: | Lage der Versuchsstation des IASP in Berge bei Nauen (Google Maps, 2016).....   | 99  |
| Abbildung 28: | Temperaturen (Monatsmittelwerte) in den Versuchsjahren 2014 bis 2016 im Vergleich zum langjährigen Mittel am Standort Berge .....   | 100 |
| Abbildung 29: | Monatliche Niederschlagshöhen in den Versuchsjahren 2014 bis 2016 im Vergleich zum langjährigen Mittel am Standort Berge .....  | 100 |
| Abbildung 30: | Parzellen mit frisch ausgebrachten Gärprodukten im Feldversuch im Herbst 2015 .....   | 102 |
| Abbildung 31: | Entwicklung des pH-Wertes im Feldversuch. Daten sind Mittelwerte aus vier Wiederholungen.....   | 105 |
| Abbildung 32: | Entwicklung der Phosphorgehalte des Bodens im Feldversuch. Daten sind Mittelwerte aus vier Wiederholungen.....  | 108 |
| Abbildung 33: | Entwicklung der Kaliumgehalte des Bodens im Feldversuch. Daten sind Mittelwerte aus vier Wiederholungen. ....   | 109 |
| Abbildung 34: | Entwicklung der Kohlenstoffgehalte (C <sub>ges</sub> ) des Bodens im Feldversuch. Daten sind Mittelwerte aus vier Wiederholungen. ....  | 110 |

|  |     |
|--|-----|
| Abbildung 35: Trockenmasseerträge von Senf, Roggen, Mais und Weizen im Feldversuch. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen für die jeweilige Pflanzenart (Tukey's HSD Test, $p \leq 0,05$ ). ..... | 112 |
| Abbildung 36: Entwicklung der Wuchshöhe von Roggen im Feldversuch im Jahr 2015 .....   | 113 |
| Abbildung 37: Entwicklung der Wuchshöhe von Mais im Feldversuch im Jahr 2015 .....   | 113 |
| Abbildung 38: Entwicklung des Blattgrüns bei Roggen im Feldversuch im Jahr 2015 .....  | 114 |
| Abbildung 39: Entwicklung des Blattgrüns bei Mais im Feldversuch im Jahr 2015 .....  | 115 |
| Abbildung 40: Entwicklung des Blattgrüns bei Weizen im Feldversuch im Jahr 2016 .....  | 116 |

## Tabellenverzeichnis

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Tabelle 1:  | Störstoffanteil im Bioabfall und Zusammensetzung der Störstoffe (Fricke <i>et al.</i> , 2003).....   | 11 |
| Tabelle 2:  | Verbleibende Anteile an Störstoffen und Ausgangsmaterial nach Siebung mit verschiedenen Maschenweiten. Verändert nach Knoop <i>et al.</i> (2015).....  | 12 |
| Tabelle 3:  | Nährelementgehalte, physikalische und chemische Eigenschaften der Gärprodukte der Kategorie 1 (Teil 1).....  | 16 |
| Tabelle 4:  | Schwermetall- und Störstoffgehalte der Gärprodukte der Kategorie 1 und entsprechende Grenzwerte gemäß BioAbfV. Überschreitungen der Grenzwerte sind gelb (für 30 t ha <sup>-1</sup> TM in drei Jahren) bzw. rot (für 20 t ha <sup>-1</sup> TM in drei Jahren) markiert. ....                   | 18 |
| Tabelle 5:  | Mischungsverhältnisse und angestrebte N-Gehalte der Gärprodukte der Kategorie 2 mit den Zuschlagstoffen Kalkammonsalpeter (= „KAS“), Tiermehl (= „TM“), Ton und Stroh.....   | 20 |
| Tabelle 6:  | Nährelementgehalte, chemische und physikalische Eigenschaften der Gärprodukte der Kategorie 2 (mit Zuschlagstoffen). ....  | 21 |
| Tabelle 7:  | Eingewogene Menge an Kohlenstoff (mg je Gefäß) in den drei Bodenatmungsversuchen.....  | 24 |
| Tabelle 8:  | Textur und chemischer Status des Bodens an den Standorten Thyrow und Berge .....   | 24 |
| Tabelle 9:  | Kohlenstoffmineralisierungsrate (% des eingewogenen C) der Gärprodukte und von Glucose in den drei Bodenatmungsversuchen nach 100 Tagen. Verschiedene Buchstaben innerhalb einer Zeile markieren signifikante Unterschiede zwischen den Testsubstraten (Tukey's HSD-Test, $P \leq 0,05$ )..... | 25 |
| Tabelle 10: | Trockensubstanz- und Stickstoffgehalte und pH-Werte von Kalkammonsalpeter (KAS) und Stallmist in den Regenwurmvermeidungstests.....  | 35 |
| Tabelle 11: | Geprüfte Faktorkombinationen in den Vermeidungstests mit Regenwürmern. Mit „X“ markierte Kombinationen wurden getestet. ....   | 36 |
| Tabelle 12: | Anzahl und Entwicklungsstadien der Regenwürmer in den einzelnen Versuchen.....   | 37 |
| Tabelle 13: | pH-Werte des Bodens im Vermeidungstest Oktober 2014 mit <i>E. fetida</i> und <i>A. caliginosa</i> . Daten dargestellt als Mittelwerte. ....  | 38 |
| Tabelle 14: | Vermeidung und Gewichtsveränderung bei adulten und juvenilen Tieren der Arten <i>E. fetida</i> und <i>A. caliginosa</i> und Einfluss der Haupt- und Wechselwirkungen der einzelnen Faktoren. Daten sind dargestellt als Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung. Verschiedene Buchstaben          |    |

|             |  |    |
|-------------|--|----|
|             | kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer Spalte (Tukey's HSD Test, $p \leq 0,05$ ). Kursiv und fett gedruckte Werte unterschieden sich signifikant von ihrem benachbarten Gegenstück, d.h. z.B. adulte von juvenilen Tieren. Signifikante Haupt- und Interaktionseffekte ( $p \leq 0,05$ ) sind zur besseren Übersichtlichkeit fett gedruckt.....  | 39 |
| Tabelle 15: | Vermeidung (%) durch <i>Eisenia fetida</i> in den Versuchen mit Gärprodukten der Kategorie 1 und Einfluss der Haupt- und Wechselwirkungen der einzelnen Faktoren. Daten sind dargestellt als Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer Spalte (Tukey's HSD Test, $p \leq 0,05$ ). Signifikante Haupt- und Interaktionseffekte sind zur besseren Übersichtlichkeit fett gedruckt. Kursive Daten wurden nicht in die statistische Auswertung einbezogen. ....   | 42 |
| Tabelle 16: | Vermeidungsverhalten und Gewichtsveränderung von <i>Eisenia fetida</i> in den Versuchen mit Gärprodukten der Kategorie 2 und Einfluss der Haupt- und Wechselwirkungen der einzelnen Faktoren (nur für die in zwei Aufwandmengen getesteten drei Varianten AggloGr+TM, AggloGr+KAS und KAS). Daten sind dargestellt als Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer Spalte (Tukey's HSD Test, $p \leq 0,05$ ). Signifikante Haupt- und Interaktionseffekte sind zur besseren Übersichtlichkeit fett gedruckt. .... | 44 |
| Tabelle 17: | Anzahl an Regenwürmern und Kokons je Quadratmeter im Feldversuch im Jahr 2015. Daten dargestellt als Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer Zeile (Tukey's HSD Test, $p \leq 0,05$ ).....  | 46 |
| Tabelle 18: | Chemische Eigenschaften des für die Rhizoboxenversuche verwendeten Bodens .....  | 49 |
| Tabelle 19: | Chemischer Status des Bodens 3, 7 und 28 Wochen nach der Applikation der Gärprodukte. Daten sind Mittelwerte aus Doppelbestimmungen.....   | 52 |
| Tabelle 20: | Parameter der Wurzelmorphologie 3, 7 und 28 Wochen nach der Applikation der Gärprodukte. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen innerhalb einer Zeile signifikante Unterschiede (Tukey's HSD Test, $P \leq 0.05$ ).....  | 53 |
| Tabelle 21: | Prüffaktoren in den phytotoxikologischen Tests .....   | 58 |
| Tabelle 22: | Aufgang, Wuchshöhe und Biomasseertrag im phytotoxikologischen Test mit Gärprodukten der Kategorie 1 (Lieferung <b>Juni 2014</b> ). Daten   |    |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
|             | sind dargestellt als Mittelwerte $\pm$ SD. Unterschiedliche Buchstaben innerhalb einer Spalte markieren signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen für diese Aufwandmenge für den jeweiligen Parameter (Tukey's HSD Test bzw. Games-Howell's Test (grau unterlegte Zellen), $P \leq 0.05$ ). ....  | 60 |
| Tabelle 23: | Aufgang, Wuchshöhe und Biomasseertrag im phytotoxikologischen Test mit Gärprodukten der Kategorie 1 (Lieferung <b>Oktober 2015</b> ). Daten sind dargestellt als Mittelwerte $\pm$ SD. Unterschiedliche Buchstaben innerhalb einer Spalte markieren signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen für diese Aufwandmenge für den jeweiligen Parameter (Tukey's HSD Test bzw. Games-Howell's Test (grau unterlegte Zellen), $P \leq 0.05$ ). <i>Zellen in Kursiv: Daten wurden nicht in die statistische Auswertung einbezogen.</i> .....  | 62 |
| Tabelle 24: | Aufgang, Wuchshöhe und Biomasseertrag im phytotoxikologischen Test mit ausgewählten <b>Gärprodukten der Kategorie 2</b> . Daten sind dargestellt als Mittelwerte $\pm$ SD (Werte ohne SD: Nur in einem Gefäß überlebende Pflanzen, deswegen keine Wiederholungen; Zellen ohne Werte: keine überlebende Pflanzen in den vier Gefäßen dieser Variante). Unterschiedliche Buchstaben innerhalb einer Spalte markieren signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen für diese Aufwandmenge für den jeweiligen Parameter (Tukey's HSD Test bzw. Games-Howell's Test (grau unterlegte Zellen), $P \leq 0.05$ ). Zellen ohne Buchstaben: Varianzanalyse aufgrund fehlender Werte nicht möglich..... | 64 |
| Tabelle 25: | Prüffaktoren im Gefäßversuch 2015.....  | 68 |
| Tabelle 26: | Chemische Eigenschaften des für den Gefäßversuch 2015 verwendeten Bodens .....  | 68 |
| Tabelle 27: | Prüfglieder im Gefäßversuch 2016. Hellgrau unterlegte Varianten wurden nur im Versuch mit Hafer getestet, dunkelgrau unterlegte Varianten nur im Versuch mit Raps ausgewertet. ....   | 71 |
| Tabelle 28: | Chemische Eigenschaften des für den Gefäßversuch 2016 verwendeten Bodens .....  | 71 |
| Tabelle 29: | Ertrag, Ertragsstruktur und Proteingehalt von Hafer im Gefäßversuch 2015. Daten dargestellt als Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer Spalte (Tukey's Test, $p \leq 0,05$ ).....   | 75 |
| Tabelle 30: | Gehalte an Stickstoff, Phosphor und Kalium im Erntegut von Hafer im Gefäßversuch 2015 .....   | 77 |

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Tabelle 31: | Durch die Gärprodukte ausgebrachte und durch Hafer entzogene Mengen an Stickstoff, Phosphor und Kalium im Gefäßversuch 2015. Daten sind Mittelwerte aus Doppelbestimmungen. ....   | 78 |
| Tabelle 32: | Gehalte an Gesamt-, organischem und heißwasserlöslichem Kohlenstoff und pH-Werte des Bodens im Gefäßversuch mit Hafer im Jahr 2015. Daten sind Mittelwerte aus Doppelbestimmungen. ....  | 79 |
| Tabelle 33: | C <sub>hwl</sub> -Bereiche zur Ableitung von OS-Gehaltsklassen für grundwasserferne Sand- und Lehmböden mit Jahresdurchschnittstemperaturen von 6-10°C und Jahresniederschlägen von 400-800 mm. Nach Schulz (1997).....  | 80 |
| Tabelle 34: | Ertrag, Ertragsstruktur und Proteingehalt von Hafer im Gefäßversuch 2016. Daten dargestellt als Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer Spalte (Tukey's Test, $p \leq 0,05$ ). Bei Varianten markiert mit * konnten nur drei Wiederholungen in die Auswertung einbezogen werden. ....             | 84 |
| Tabelle 35: | Gehalte an N, P und K im Erntegut von Hafer im Gefäßversuch 2016. Daten dargestellt als Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung. Unterschiedliche Buchstaben innerhalb einer Spalte und Materialgruppe markieren signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen (Tukey's HSD Test, $p \leq 0,05$ ). Bei Varianten markiert mit * konnten nur drei Wiederholungen in die Auswertung einbezogen werden. .... | 85 |
| Tabelle 36: | Durch Gärprodukte ausgebrachte und durch Hafer entzogene Mengen von Stickstoff, Phosphor und Kalium im Gefäßversuch 2016. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer Spalte für das jeweilige Nährelement (Tukey's Test, $p \leq 0,05$ ). Bei Varianten markiert mit * konnten nur drei Wiederholungen ausgewertet werden. ....            | 86 |
| Tabelle 37: | Gehalte an Gesamt-, organischem und heißwasserlöslichem Kohlenstoff und pH-Werte des Bodens im Gefäßversuch mit Hafer im Jahr 2016. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer Spalte (Tukey's Test, $p \leq 0,05$ ). Bei Varianten markiert mit * konnten nur drei Wiederholungen in die Auswertung einbezogen werden. ....               | 87 |
| Tabelle 38: | Biomasseertrag und Blattfläche von Raps im Gefäßversuch 2015. Daten dargestellt als Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer Spalte (Tukey's Test, $p \leq 0,05$ ). ....   | 88 |

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| Tabelle 39: | Durch Gärprodukte ausgebrachte und durch Raps entzogene Mengen von N, P und K im Gefäßversuch 2015. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer Spalte für das jeweilige Nährelement (Tukey's Test, $p \leq 0,05$ ).....   | 89  |
| Tabelle 40: | Gehalte an N, P und K bei Raps im Gefäßversuch 2015. Ergebnisse sind dargestellt als Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung. Unterschiedliche Buchstaben innerhalb einer Spalte markieren signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen (Tukey's HSD Test, $p \leq 0,05$ ).....   | 90  |
| Tabelle 41: | Gehalte an Gesamt-, organischem und heißwasserlöslichem Kohlenstoff und pH-Werte des Bodens im Gefäßversuch mit Raps im Jahr 2015.....  | 91  |
| Tabelle 42: | Biomasseertrag von Raps im Gefäßversuch 2016. Daten dargestellt als Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer Spalte (Tukey's Test, $p \leq 0,05$ ).....   | 94  |
| Tabelle 43: | Durch Gärprodukte ausgebrachte und durch Raps entzogene Mengen von Stickstoff, Phosphor und Kalium im Gefäßversuch 2016. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer Spalte für das jeweilige Nährelement (Tukey's Test, $p \leq 0,05$ ).....  | 94  |
| Tabelle 44: | Gehalte an Stickstoff, Phosphor und Kalium im Erntegut von Raps im Gefäßversuch 2016. Daten sind dargestellt als Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung, sofern eine ausreichende Anzahl Wiederholungen ausgewertet werden konnten. Unterschiedliche Buchstaben innerhalb einer Spalte markieren signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen (Tukey's HSD Test, $p \leq 0,05$ ).....                                  | 95  |
| Tabelle 45: | Beschreibung der Prüfglieder im Feldversuch.....  | 102 |
| Tabelle 46: | Durch die Gärprodukte ausgebrachte Mengen an Phosphor und Kalium im Feldversuch .....   | 103 |
| Tabelle 47: | Ausgebrachte Mengen an Gärprodukten insgesamt und an darin enthaltenen Schwermetallen (Summe aus vier Ausbringungen). .....   | 103 |
| Tabelle 48: | Gehalte an Gesamtstickstoff ( $N_{\text{ges}}$ ) und mineralischem Stickstoff ( $N_{\text{min}}$ ) in verschiedenen Bodentiefen im Feldversuch in Abhängigkeit von Düngerart, Aufwandmenge und Probenahmezeitpunkt. Daten sind Mittelwerte aus vier Wiederholungen. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer Spalte (Tukey's HSD Test, $p \leq 0,05$ )..... | 106 |
| Tabelle 49: | $C_{\text{ges}}$ -Gehalte des Bodens im August 2016. Daten sind Mittelwerte aus vier Wiederholungen $\pm$ Standardabweichung. Verschiedene  |     |

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
|             | Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen (Tukey's HSD Test, $p \leq 0,05$ ). ....   | 111 |
| Tabelle 50: | Ertrag (86 % TS), Ertragsstruktur und Proteingehalt von Winterweizen im Feldversuch im Jahr 2016. Daten sind Mittelwerte aus vier Wiederholungen $\pm$ Standardabweichung. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer Spalte (Tukey's HSD Test, $p \leq 0,05$ ). ....  | 116 |
| Tabelle 51: | Nährelementgehalte im Erntegut ( $\text{g kg}^{-1}$ TM) im Feldversuch. Daten sind Mittelwerte aus vier Wiederholungen $\pm$ Standardabweichung. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer Spalte für das jeweilige Nährelement (Tukey's HSD Test, $p \leq 0,05$ ). ....  | 118 |
| Tabelle 52: | Ausgebrachte Mengen an Schwermetallen in Summe aller vier Ausbringungen. Überschreitungen der durch die BioAbfV vorgegebenen Grenzwerte sind rot markiert. ....  | 120 |
| Tabelle 53: | Schwermetallgehalte im Boden im Oktober 2015 und August 2016. Daten sind Mittelwerte aus vier Wiederholungen $\pm$ Standardabweichung. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer Spalte für den jeweiligen Probenahmezeitpunkt (Tukey's HSD Test, $p \leq 0,05$ ). ....   | 121 |
| Tabelle 54: | Schwermetallgehalte im Erntegut von Roggen, Mais und Weizen im Feldversuch. Daten sind Mittelwerte aus vier Wiederholungen $\pm$ Standardabweichung. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer Spalte für das jeweilige Pflanzenmaterial (Tukey's HSD Test, $p \leq 0,05$ ). ....   | 122 |
| Tabelle 55: | Kummulierter Schwermetallentzug (prozentualer Anteil der ausgebrachten Menge) durch Roggen, Mais und Weizen im Feldversuch. ....   | 124 |
| Tabelle 56: | Bewertung der verschiedenen Gärprodukte hinsichtlich ihrer Produkteigenschaften und ihrer Einflüsse auf den Boden und die Pflanzenentwicklung. Bewertungsskala: „--“ = sehr gering bzw. deutlich negative Effekte, „-“ = gering bzw. eher negative Effekte, „0“ = mittel bzw. keine Effekte, „+“ = hoch bzw. eher positive Effekte, „++“ = sehr hoch bzw. deutlich positive Effekte, ( ) = in Ausnahmefällen beobachtet bzw. nicht gesichert ..... | 130 |



## Abkürzungsverzeichnis

|                    |   |
|--------------------|---|
| ATP                | Adenosintriphosphat   |
| BBCH               | Skala zur Beschreibung der Entwicklungsstadien mono- und dikotyle Pflanzen              |
| BBodSchV           | Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung   |
| BioAbfV            | Bioabfallverordnung   |
| BTU                | Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg                             |
| C <sub>ges</sub>   | Gesamtkohlenstoff   |
| C <sub>hwf</sub>   | heißwasserlöslicher Kohlenstoff   |
| C <sub>org</sub>   | organischer Kohlenstoff   |
| DL                 | Doppellaktatmethode   |
| DüV                | Düngeverordnung   |
| EEG                | Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Kurztitel Erneuerbare-Energien-Gesetz)     |
| GICON GmbH         | Großmann Ingenieur Consult GmbH   |
| GP                 | Gärprodukt  |
| IASP               | Institut für Agrar- und Stadtökologische Projekte an der Humboldt-Universität zu Berlin |
| KAS                | Kalkammonsalpeter   |
| KrWG               | Kreislaufwirtschaftsgesetz  |
| n.b.               | nicht bestimmt  |
| N <sub>ges</sub>   | Gesamtstickstoff  |
| N <sub>min</sub>   | Mineralisch gebundener Stickstoff   |
| N <sub>verf.</sub> | Pflanzenverfügbarer Stickstoff  |
| SD                 | Standardabweichung  |
| TKG                | Tausendkorngewicht  |
| TM                 | Trockenmasse  |
| TS                 | Trockensubstanzgehalt   |
| WHK                | Wasserhaltekapazität  |

## Zusammenfassung

Die Verwertung von Bioabfällen in Biogasanlagen ist ein bewährtes Verfahren, das dank der deutschlandweiten Einführung der getrennten Sammlung von Bioabfällen am 1. Januar 2015 in Zukunft weiter an Bedeutung gewinnen wird. Damit einher geht, dass große Mengen an Gärresten entstehen, die sinnvoll entsorgt werden müssen. Ziel der deutschen wie der europäischen Politik ist es, die in diesen Gärresten enthaltenen Nährstoffe und organischen Verbindungen einer landwirtschaftlichen Nutzung zuzuführen. Die Gärreste werden dazu in der Regel kompostiert und gegebenenfalls durch Agglomeratbildung oder Pelletierung weiter aufbereitet. Im Rahmen dieser Arbeit sollten Einsatzmöglichkeiten und -grenzen derartiger Gärreste untersucht werden. Außerdem sollte geprüft werden, ob durch verschiedene Zuschlagstoffe die Eigenschaften der Produkte so verbessert werden können, dass ein marktfähiges Düngeprodukt entsteht. Dazu wurden ein Feldversuch, Gefäßversuche, Versuche mit Rhizoboxen, Bodenatmungsversuche, phytotoxikologische Tests und Vermeidungstests mit Regenwürmern durchgeführt. Die Ergebnisse können wie folgt zusammen gefasst werden:

- Die unmittelbare Düngewirkung von kompostierten Gärprodukten aus Bioabfällen ist aufgrund der niedrigen Stickstoffverfügbarkeit gering. In den Gärprodukten sind aber hohe Gehalte an Phosphor und Kalium enthalten. Langfristig ist durch Einsatz solcher Gärprodukte der Aufbau eines Nährstoffdepots im Boden möglich. Daraus erwächst ein Einsparungspotential für andere Düngemittel. Außerdem zeichnen sich die Produkte durch basisch wirkende Bestandteile aus, welche die Kalkung ganz oder teilweise ersetzen können.
- Aus Bioabfällen hergestellte Komposte und Gärprodukte können in erheblichem Maße zur Steigerung der Humusgehalte im Boden beitragen. Ca. 80 % des enthaltenen Kohlenstoffs liegt in stabilisierter Form vor und kann im Boden sequestriert werden.
- Problematisch sind hohe Gehalte an Schwermetallen und anderen Störstoffen. Die gesetzlich vorgegebenen Grenzwerte wurden in 50 % der untersuchten Chargen überschritten.
- Phytotoxische Effekte wurden nur in Einzelfällen festgestellt und waren nicht dosisabhängig, sondern wurden durch punktuelle Verunreinigungen verursacht.
- Die Aktivität der Mikroorganismen im Boden wurde durch Anwendung der Gärprodukte deutlich gefördert.
- Der Einfluss der Gärprodukte auf Regenwürmer konnte nicht eindeutig bestimmt werden. Eine Einschränkung der Habitatfunktion nach Gärproduktanwendung wurde nicht festgestellt. Inwieweit Regenwürmer von Gärprodukten profitieren können hängt vor allem von den Ansprüchen der jeweiligen Regenwurmart an Nahrung und Lebensraum ab.
- Die Aufbereitung durch Agglomeratbildung oder Pelletierung ist möglich, ohne dass die wesentlichen positiven Eigenschaften davon beeinträchtigt werden.
- Durch Beimengung von Zuschlagstoffen können die Düngewirkung und die physikalischen Eigenschaften der Produkte verändert werden. Dies reduziert jedoch die Humusreproduktionswirkung. Hier besteht ein Zielkonflikt zwischen der Herstellung eines Düngeproduktes und der Produktion eines Bodenhilfsstoffes mit hohen Gehalten an stabiler organischer Substanz.

## Abstract

Fermentation of biowaste is an established method, which due to the introduction of mandatory separate collection of biowaste throughout Germany on January 1<sup>st</sup>, 2015 will become even more important in the future. As a result large amounts of digestates have to be dealt with. Under the aspect of nutrient recycling an agricultural use of these digestates is the declared aim of German and European policy. Composting and further treatment like the formation of agglomerates and pellets with low water content are often performed to achieve a sufficient sanitation and stability of the biowaste digestates. The scope of the present work was to determine the possibilities and limits for the application of composted digestates from biowaste. Furthermore it was tested whether it is possible to enhance the properties of the products by adding different amendments and to thereby create a marketable fertilizer product. A field trial, pot experiments, experiments with rhizoboxes, phytotoxicity tests and avoidance tests with earthworms were carried out with differently processed biowaste digestates. The results can be summarized as follows:

- The immediate fertilizing effect of composted biowaste digestates is very limited because of the low plant availability of nitrogen. The contents of phosphorus and potassium are however high. Repeated application of biowaste digestate can help to establish a stable nutrient pool in the soil and therefore holds a clear savings potential for other fertilizers. In addition, the products are characterized by basic constituents who can replace liming completely or partly.
- Composts and fermentation products made from organic waste can contribute significantly to the increase of humus content in the soil. Approx. 80 % of the contained carbon is in stabilized form and can be sequestered in the soil.
- High concentrations of heavy metals and other contaminants are problematic. The legal limits were exceeded in 50 % of the tested batches.
- Phytotoxic effects were observed only in isolated cases and were not dose-dependent, but were caused by selective impurities.
- The activity of the microorganisms in the soil was significantly promoted by the application of the digestates.
- The influence of the digestate products on earthworms could not be determined unequivocally. A restriction of the habitat function after digestate application was not detected. The extent to which earthworms can profit from fermented and composted biowaste depends above all on the demands of the particular earthworm species on food and habitat.
- Processing by agglomeration or pelletizing to increase transportability and storage stability is possible without impairing the essential positive properties of the digestates.
- The addition of amendments can be used to adjust the fertilizing and physical properties of the products. This, however, reduces the humus reproduction effect. There is a certain conflict of objectives between the production of a fertilizer product and the production of a soil amendment with high contents of stable organic matter.

## 1. Einleitung

Die Erzeugung von Biogas aus Rückständen, Nebenprodukten und Abfällen, teilweise in Kombination mit nachwachsenden Rohstoffen, ist eine Form der Biomassekonversion, die aus technischen wie auch aus wirtschaftlichen Gründen in den letzten Jahren erheblich an Bedeutung gewonnen hat (Dieckmann *et al.*, 2016; Fricke *et al.*, 2015; Kupper und Fuchs, 2007). Spätestens seit Beginn der 90er Jahre stehen Anaerobtechnologien zur Verfügung, mit denen feste Abfallstoffe effektiv verarbeitet werden können (Fricke *et al.*, 2015). Die Erzeugung von Biogas ist dabei eine besonders geeignete und sehr effektive Methode für den Abbau und die Verwertung von heterogenen, ligninarmen und sehr feuchten organischen Materialien, sowohl unter meso-, wie auch unter thermophilen Bedingungen (Thrän *et al.*, 2016; Kranert und Cord-Landwehr, 2010; Wong, 1985). Es ist davon auszugehen, dass die Anzahl der Anlagen, die Bioabfälle als Substrat nutzen, in Zukunft weiter ansteigen wird (BMU, 2012; Schüch *et al.*, 2014). Dies wird durch die im Kreislaufwirtschaftsgesetz geforderte Recyclingquote von 65 % und die seit Januar 2015 deutschlandweit gültige Pflicht zur getrennten Sammlung von Bioabfällen gefördert (Fricke *et al.*, 2015).

Bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen besteht das Anwendungsziel hauptsächlich in der Gewinnung von Energie, wobei die entsprechenden Gärprodukte in der Regel ohne jede weitere Aufbereitung als Dünger auf landwirtschaftliche Nutzflächen zurückgeführt werden (Weiland, 2015). Die Biogasproduktion aus Abfällen und Reststoffen verfolgt demgegenüber neben der Erzeugung von Energie vornehmlich das Ziel, anfallende Reststoffe umweltschonend zu entsorgen. Die dabei entstehenden Gärreste zeichnen sich durch hohe Gehalte an organischer Substanz sowie z.T. an Makro- und Mikronährstoffen aus. Sie können als Sekundärrohstoffdünger, Bodenverbesserungsmittel oder als Mischkomponente in Vegetationstragschichten und Kultursubstraten verwendet werden (Kranert und Cord-Landwehr, 2010; Arthurson, 2009; Bardos, 2004; Desalegn *et al.*, 2005; Weber *et al.*, 2007; Wong, 1985). Aus getrennt erfassten Bioabfällen hergestellte Komposte und Vergärungsrückstände können so dazu beitragen, die Humusgehalte von Böden zu erhöhen oder zu stabilisieren und die bodenbiologische Aktivität zu fördern (BMU, 2012). Im Sinne der Nachhaltigkeit ist eine Wiedergewinnung und -verwertung der wertgebenden Inhaltsstoffe erklärtes Ziel der deutschen wie auch der europäischen Politik, wobei der Einsatz der Gärreste als Düngemittel in der Landwirtschaft im Vordergrund steht (BMELV, 2012; Saveyn und Eder, 2014). Dies erfordert jedoch, anders als bei rein landwirtschaftlichen Ausgangssubstraten, häufig eine besondere Aufbereitung der Gärreste. Kompostierung sowie gegebenenfalls die weitere Aufbereitung der Gärreste durch Pelletierung oder Agglomeration sind dabei häufig notwendig, um eine ausreichende Hygienisierung zu erzielen und um das Endprodukt durch Wasserentzug und Formgebung lagerfähiger und transportwürdiger zu machen (Arthurson, 2009; Wong, 1985; Dieckmann *et al.*, 2016). Die Vergärung und anschließende Kompostierung und Aufbereitung von Bioabfällen und die Auswirkungen dieser Prozessschritte auf Qualität und Sicherheit des Endproduktes spielten bis zur Veränderung des EEG im Jahr 2012 wirtschaftlich und politisch

nur eine geringe Rolle und wurden in der Forschung dementsprechend vernachlässigt. Vorhanden sind zwar Untersuchungen zur Eignung von Bioabfällen als Substrat für Biogas- und Kompostanlagen (Zhang *et al.*, 2014; BMU, 2012; Strippel *et al.*, 2016; Krassowski *et al.*, 2013). Es fehlen aber ausführliche Langzeituntersuchungen zur weiteren Verwendung der entstehenden Gärrückstände hinsichtlich ihrer Beeinflussung von Pflanzenentwicklung, chemisch-physikalischer Bodenbeschaffenheit und Aktivität der Bodenorganismen. Wichtig ist dabei nicht nur die Ermittlung der potentiellen Düngewirkung, sondern auch eine Risikoabschätzung, da Komposte und Gärreste aus Bioabfällen auch eine Quelle verschiedener organischer Schadstoffe und von Schwermetallen sein können.

Eine reine Inhaltsstoffanalyse ist weder für die Ermittlung der Dünge-, noch für die Untersuchung einer möglichen Schadwirkung ausreichend, da sie nicht die biologische Verfügbarkeit und die Abbauprozesse im Boden berücksichtigt (Kupper und Fuchs, 2007). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden deshalb neben einer ausführlichen Produktcharakterisierung Feld- und Gefäßversuche, Versuche mit Rhizoboxen, phytotoxikologische Tests und Vermeidungstests mit Regenwürmern kombiniert, um folgende Fragestellungen zu beantworten:

- Gibt es aus pflanzenbaulicher Sicht eine Einsatzmöglichkeit der Gärrückstände als Dünger oder ist, eventuell in Abhängigkeit von der Einsatzmenge, mit negativen Auswirkungen für die Pflanzenentwicklung zu rechnen?
- Welche Auswirkungen haben diese Gärrückstände auf die Ertragsbildungsprozesse und auf die innere und äußere Qualität der Ernteprodukte?
- Welchen Einfluss haben diese Gärrückstände auf die Bodenbiologie, insbesondere auf Regenwürmer?
- Welchen Beitrag können aufbereitete Gärrückstände für den Kohlenstoffhaushalt im Boden leisten und wie bzw. in welchem Umfang erfolgt der Abbau des enthaltenen Kohlenstoff im Boden?
- Welche Rolle spielt die Aufbereitung der Gärrückstände durch Pelletierung oder Agglomeratbildung für den Pflanzenbau und die Bodenbiologie?
- Kann durch Zugabe organischer oder mineralischer Zuschlagstoffe der Düngewert der Produkte gesteigert werden? Welche Auswirkung hat dies auf die pflanzenbauliche und ökologische Wirkung der Produkte?

Die Arbeit wurde im Rahmen des Projektes VeNGA (Grundlagenuntersuchungen zur Verwertung und Nährstoffnutzung der boden- und pflanzenbezogenen Wirkung von Gärrückständen aus der Abfallvergärung) angefertigt. An dem Verbundvorhaben waren die Projektpartner Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg (BTU-Cottbus-Senftenberg), das Institut für Agrar- und Stadtökologische Projekte an der Humboldt-Universität zu Berlin (IASP) und die Großmann Ingenieur Consult GmbH (GICON GmbH) beteiligt. Die hier beschriebenen Untersuchungen wurden, sofern nicht anders gekennzeichnet, am IASP durchgeführt.

## 1.1 Definitionen

### „Bioabfall“

Bioabfälle im Sinne der Bioabfallverordnung sind „Abfälle tierischer oder pflanzlicher Herkunft oder aus Pilzmaterialien zur Verwertung, die durch Mikroorganismen, bodenbürtige Lebewesen oder Enzyme abgebaut werden können, einschließlich Abfälle zur Verwertung mit hohem organischen Anteil tierischer oder pflanzlicher Herkunft oder an Pilzmaterialien“ (BioAbfV, 2013). Die Verordnung schließt Garten- und Parkabfälle, Speisereste aus Privathaushalten, Restaurants, Kantinen etc. sowie aus der Nahrungsmittelherstellung ein, bezieht sich aber nicht auf landwirtschaftliche Abfälle, Stallmist, Gülle, Klärschlamm oder biologisch abbaubare Abfälle aus anderen Industriezweigen als der Nahrungsmittelproduktion wie z.B. Papier oder Reste der Holz- und Textilverarbeitung. Kommunaler organischer Abfall, wie er in Abfallvergärungsanlagen verwertet wird, setzt sich überwiegend aus Garten- und Parkabfällen und aus mittels Biotonne oder Biosack getrennt erfasstem Bioabfall zusammen (Schüch *et al.*, 2014).

Bioabfälle dürfen nur in hygienisch unbedenklichem Zustand eingesetzt werden. Die seuchen- und phytohygienische Unbedenklichkeit ist gemäß der BioAbfV durch eine entsprechende Behandlung (z. B. thermophile Kompostierung oder Vergärung) zu gewährleisten, wobei entsprechend hohe Temperaturen über einen ausreichend langen Zeitraum sicherzustellen sind (siehe BioAbfV Anhang 2, „Anforderungen an die hygienisierende Behandlung von Bioabfällen zur Gewährleistung der seuchen- und phytohygienischen Unbedenklichkeit“).

Biogasgärreste unterliegen dann der Bioabfallverordnung, wenn sie Bioabfall als einziges Substrat oder im Gemisch mit anderen Substraten enthalten (LfL, 2013b).

### „Gärrest“ bzw. „Gärprodukt“

Die Begriffe „Gärrest“ und „Gärprodukt“ werden häufig synonym verwendet. Oft wird das Wort „Gärprodukt“ dem Begriff „Gärrest“ vorgezogen, weil den wertvollen Inhaltsstoffen Rechnung getragen werden soll. Im Rahmen dieser Arbeit wird unter „Gärrest“ das nicht weiter aufbereitete Material nach der Fermentation im Biogasreaktor verstanden, während die aufbereiteten, d.h. kompostierten, gesiebten und gegebenenfalls pelletierten bzw. agglomerierten Rückstände als „Gärprodukte“ bezeichnet werden.

### Pelletierung und Agglomeration

Mit „Pelletierung“ und „Agglomeration“ werden im Deutschen verschiedene Aufbereitungsverfahren bezeichnet, wobei den Begriffen im Einzelfall unterschiedliche Definitionen zu Grunde liegen, die je nach Anwender auch miteinander vertauscht werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Bezeichnungen ausschließlich wie folgt verstanden und verwendet:

- Unter Pelletierung wird ein Prozess verstanden, bei dem mit oder ohne Einsatz von Bindemitteln zerkleinerte Biomasse unter Einwirkung von Druck in einem Presskanal so ver-

ichtet wird, dass „Pellets“ entstehen. Diese sind in der Regel zylinderförmig mit Bruchkanten an beiden Enden. Durch den hohen Druck und die Reibung im Presskanal wird thermische Energie in Form von Wärme frei gesetzt, welche neben dem mechanischen Druck erheblich für das Verkleben und Zusammenhalten der einzelnen Biomassepartikel verantwortlich ist (Englisch *et al.*, 2016).

- Unter Agglomeration wird ein Prozess verstanden, bei dem aus kleineren einzelnen Aggregaten größere Partikel aufgebaut werden, wobei in der Regel Bindemittel zum Einsatz kommen (Bück und Tsotsas, 2016; Coucoulas, 2003). Die entstehenden Produkte sind mehr oder weniger kugelförmig. Im Gegensatz zur Pelletierung wird nicht mit Druck gearbeitet. Die Partikel werden vielmehr in Mischern oder ähnlichen Geräten aufgebaut.

## 1.2 Situation in Deutschland

Seit dem 1.1.2015 ist die getrennte Sammlung und Verwertung von Bioabfällen in Deutschland Pflicht (§11 KrWG). Ende 2014 gab es in Deutschland 113 Biogasanlagen, die jeweils Bioabfälle gemäß BioAbfV in Mengen von mindestens 5000 t pro Jahr als Inputsubstrat einsetzten. 75 % dieser Anlagen verwerten vorwiegend (d.h. zu über 50 %) getrennt erfasste Bioabfälle aus privaten Haushalten in Kombination mit Garten- und Parkabfällen. Die restlichen Anlagen nutzen in erster Linie gewerbliche Abfälle als Substrat (Raussen und Kern, 2014). Die Gesamtzahl aller Anlagen, die für die Co-Fermentation von Bioabfällen zugelassen sind und diese in geringeren Mengen als ein Substrat unter vielen einsetzen, liegt mit 984 (Stand 2011) deutlich darüber (Schüch *et al.*, 2014).

Im Durchschnitt werden pro Jahr und Einwohner mehr als 100 kg Bio- und Grünabfälle getrennt erfasst (davon ca. 19 kg reine Lebensmittelabfälle), was einer Gesamtmenge von rund neun Millionen Tonnen pro Jahr entspricht (BMU, 2012; Thrän *et al.*, 2016). Ca. 83 % davon stammen direkt aus der Biotonne, die über Holsysteme von den Abfallentsorgern abgenommen wird. Dies macht Bioabfall in Deutschland zur mengenmäßig bedeutendsten Wertstofffraktion (Kehres, 2016a). Laut Schüch *et al.* (2014) ist davon auszugehen, dass durch Ausweitung von Sammelgebieten und eine verbesserte Anschlussquote auch ländlicher Gebiete eine zusätzliche Menge von bis zu drei Millionen Tonnen an kommunalen Bio- und Grünabfällen pro Jahr erfasst werden könnte. Insgesamt werden jedoch zurzeit (Stand Ende 2014) nur ca. ein Drittel aller Bioabfälle in Biogasanlagen verwertet, der Rest wird direkt der Kompostierung zugeführt. (Raussen und Kern, 2014; Fricke *et al.*, 2015).

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz fördert die Erzeugung von Energie aus Bioabfällen durch die erhöhte Vergütung von Strom aus Anlagen, welche Biogas aus der Bioabfallvergärung nutzen. Strom, der mit Biogas aus der Vergärung anderer Biomasse erzeugt wurde, wird geringer vergütet. Voraussetzung für die Förderung ist eine nachgelagerte Kompostierung der entstehenden Gärreste (BMU, 2012). Die Novellierung des EEG im Jahr 2012 hat nicht nur die Co-Fermentation von Bioabfällen und nachwachsenden Rohstoffen erlaubt, sondern auch zu einer Erhöhung der Vergütung für Strom aus der Abfallvergärung geführt und so weitere Anreize zur energetischen Verwertung von Bioabfällen gesetzt (Krassowski *et al.*, 2013). Diese bleiben trotz der weiteren

Anpassungen des Gesetzes in den Jahren 2014 und zuletzt 2016 (u.a. Umstellung der Fördersystematik auf ein Ausschreibungsmodell) weiter bestehen (Rauh, 2016). Gleichzeitig ist der Neubau von Biogasanlagen auf der Basis von Gülle und nachwachsenden Rohstoffen nach den Anpassungen des EEG kaum noch ökonomisch sinnvoll. Die Vergütung von Strom auf der Basis der Energiepflanzenvergärung hat sich durch die Novelle des EEG im Jahr 2014 um bis zu 40 % verringert. Es ist deshalb umso mehr damit zu rechnen, dass sich die Aufmerksamkeit der Biogaserzeuger fortan verstärkt auf Siedlungs- und Industrieabfälle richtet (Friege *et al.*, 2015).

Die Vergärung der Bioabfälle erfolgt in Deutschland sowohl in Nass- als auch in Trockenfermentationsanlagen und sowohl in kontinuierlichen, wie auch in absätzigen Verfahren. Seit 2006 dominieren bei neu in Betrieb genommenen Anlagen jedoch trockene, diskontinuierliche Vergärungsverfahren, die überwiegend im thermophilen Bereich gefahren werden (Fricke *et al.*, 2015). Während bei der Kompostierung Energie für den Betrieb der Anlage verbraucht wird, wird der entsprechende Aufwand bei der Vergärung durch die erzeugte Energie gedeckt und es entsteht zusätzlich ein Energieüberschuss, der je nach Anlagenart mit mindestens 100 kWh je t Input beziffert werden kann (Friege *et al.*, 2015; KiyasudeenS *et al.*, 2016).

Die Verwertung von Bioabfällen unterliegt einer Vielzahl von Gesetzen und Verordnungen, die den Bau und Betrieb der Anlagen sowie den Umgang mit anfallenden Resten und Abwässern regeln (Fricke *et al.*, 2015; Dieckmann *et al.*, 2016):

- Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) und Bioabfallverordnung (BioAbfV)
- Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) und Bundes-Bodenschutzverordnung (BBodSchV)
- Wasserhaushaltsgesetz (WHG)
- Abwasserabgabengesetz (AbwAG) und Abwasserverordnung (AbwV)
- Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) und Bundes-Immissionsschutzverordnung (BImSchV)
- Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG)
- Düngemittelgesetz (DüMG) und Düngemittel- bzw. Düngeverordnung (DüMV und DüV)
- Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)
- Biomasseverordnung (BiomasseV)

Wichtig für die Verwertung der Gärreste als Düngemittel sind besonders die DüV und die BioAbfV mit den darin aufgelisteten Grenzwerten für Schwermetall- und Störstoffgehalte.

### 1.2.1 Vergärung und Nachbehandlung der Feststoffe

Die Methangewinnung aus Bioabfällen ist ein mikrobiologischer Prozess mit einer komplexen Reaktionskette, die im Rahmen dieser Arbeit nur in vereinfachter Form als Übersicht dargestellt werden kann. Die Vergärung findet unter anaeroben Bedingungen in gesteuerten Methanreaktoren statt, die die Abbauvorgänge in naturbelassenen Ökosystemen nachbilden und die notwendigen Bedingungen optimieren bzw. stabilisieren sollen. Ursprünglich hoch komplexe unlösliche



Biopolymere aus Kohlenhydraten, Fetten und Proteinen werden dabei in vier Schritten durch mikrobielle Enzyme zu Monomeren abgebaut und zu Methan umgesetzt (Fricke *et al.*, 2015; Dieckmann *et al.*, 2016):

1. Hydrolyse
2. Versäuerung
3. Acetatbildung
4. Methanisierung.

Neben Stickstoff und Schwefel wird vor allem Kohlenstoff von anaerob arbeitenden Bakterien durch Wasserstoffatome reduziert, wobei Methan entsteht. Ein Teil des Kohlenstoffs wird außerdem durch im Ausgangsmaterial gebundenen Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid oxidiert. Die beteiligten Bakterien nutzen die bei diesen Redox-Reaktionen frei werdende Energie für den Zellstoffwechsel bzw. speichern sie in Form von chemischer Energie in intrazellulären Molekülen (ATP) (Kranert und Cord-Landwehr, 2010). Eine direkte Re-Oxidation der reduzierten Elektronenüberträger, die bei aeroben Organismen z.B. über die Atmungskette erfolgt und mit einem hohen Energiegewinn verbunden ist, steht den anaeroben Organismen der Vergärung nicht zur Verfügung. Anaerobe Prozesse sind deshalb grundsätzlich durch ein geringeres Biomassewachstum der beteiligten Organismen und eine geringere Wärmeentwicklung gekennzeichnet als aerobe Abbauprozesse (Gallert *et al.*, 2015). Dafür entsteht ein Endprodukt (Methan), das einen hohen Gehalt an Energie besitzt, welche durch Verbrennung zur Erzeugung von Wärme und Strom genutzt werden kann (Kranert und Cord-Landwehr, 2010). Bis zu 88,5 % der in den umgesetzten Kohlenstoffverbindungen enthaltenen Energie findet sich in gut geführten Reaktoren am Ende des Prozesses im Methan wieder (Gallert *et al.*, 2015). Das gewonnene Biogas ist ein Gasgemisch mit einem Methangehalt von 45 - 75 Vol.-%. Neben Methan enthält es typischerweise auch Kohlenstoffdioxid (30 - 45 Vol.-%), Schwefelwasserstoff (bis 1 Vol.-%) sowie Spuren anderer Gase (Kranert und Cord-Landwehr, 2010; Dieckmann *et al.*, 2016).

An der Vergärung sind hydrolytische, fermentative, acetogene und methanogene Bakterien beteiligt, welche nur in Syntrophie miteinander zum vollständigen Abbau der Ausgangssubstrate befähigt sind (Dieckmann *et al.*, 2016). Die mikrobiellen Abbauprozesse können in drei eng umgrenzten Temperaturbereichen ablaufen:

- psychrophil: unter 25 °C
- mesophil: 30 - 38 °C
- thermophil: 50 - 60 °C.

Psychrophile Vergärungen spielen in Deutschland aufgrund der langsamen Abbaugeschwindigkeit kaum eine Rolle. Meso- und thermophile Prozesse finden demgegenüber in der Abfallvergärung verbreitet Anwendung. Thermophile Verfahren bieten den Vorteil, dass bei ausreichender Verweildauer eine Hygienisierung des Materials schon während der Vergärung erfolgen kann. Mesophile Verfahren sind demgegenüber oft durch eine höhere Prozessstabilität gekennzeichnet, weil mehr Bakterienarten in diesem Temperaturbereich existieren und an der Umsetzung

beteiligt sind und weil weniger Ammoniak freigesetzt wird als bei thermophilen Verfahren. Ammoniak kann in größeren Mengen bestimmte Bakterienkulturen schädigen und damit prozesshemmend wirken (Fricke *et al.*, 2015).

Die anfallenden Gärreste werden in der Regel entwässert und anschließend in Kompost- oder Erdenwerken weiter aufbereitet. Das entzogene Wasser wird entweder über Kläranlagen entsorgt oder als Flüssigdünger an die Landwirtschaft abgegeben (Fricke *et al.*, 2015).

Ist eine Verwertung der festen Gärreste in der Landwirtschaft geplant, so ist dies nur nach einer Behandlung möglich, welche eine seuchen- und phytohygienische Unbedenklichkeit der Produkte gewährleistet. Die entsprechenden Anforderungen sind in der BioAbfV geregelt. Wurde die Vergärung nicht unter thermophilen Bedingungen bzw. mit zu kurzen Verweilzeiten im Reaktor durchgeführt, so folgt üblicherweise eine Kompostierung der Gärreste um eine ausreichende Hygienisierung zu gewährleisten. Der Kompostierungsprozess ist ein aerober Vorgang, bei dem verschiedene Mikroorganismengruppen mit Hilfe von Sauerstoff die ihnen angebotenen Kohlenstoffquellen oxidieren. Häufig wird das Substrat zerkleinert, um die Oberfläche zu vergrößern, oder es wird Strukturmaterial in Form von Grünschnitt o.ä. zugefügt, um das Porengefüge im Haufen aufzulockern und damit die aerobe Rotte zu erleichtern (Kranert und Cord-Landwehr, 2010; Förtsch und Meinholz, 2015). Vor allem der Abbau von wenig komplexen Kohlenstoffverbindungen führt durch intensive mikrobielle Aktivität zu einer starken Selbsterhitzung des organischen Materials, denn nur etwa die Hälfte der beim Abbau produzierten Energie wird direkt von den Mikroorganismen genutzt, der Rest wird als Wärme freigesetzt (Förtsch und Meinholz, 2015). Bei Temperaturen von 55 °C bis 60 °C werden die meisten human-, tier- und phytopathogenen Organismen abgetötet und Unkrautsamen unschädlich gemacht (Kranert und Cord-Landwehr, 2010; Kroiss und Svoldal, 2015; Arthurson, 2009; Wong, 1985). Dafür muss die Kompostierung so gesteuert werden, dass über einen Zeitraum von mindestens zwei Wochen 55 °C bzw. über einen Zeitraum von sechs Tagen über 60 °C oder über drei Tage durchgängig mindestens 65 °C auf das gesamte Rottematerial einwirken. Der Wassergehalt sollte abhängig von der Porenstruktur des Materials zwischen 45 und 65 % betragen und der pH-Wert um sieben liegen, da die mikrobielle Aktivität im Kompost sonst zu stark eingeschränkt wird und die Rotte nicht zufriedenstellend ablaufen kann (Fricke *et al.*, 2015; Kranert und Cord-Landwehr, 2010).

### 1.2.2 Pelletierung bzw. Agglomeration von Gärresten und Komposten

Pelletierung bzw. Agglomeration können zur Aufbereitung von losen Substraten wie Gärresten und Komposten verwendet werden, um Produkte mit homogenen physikalischen Merkmalen und günstigen Transport- und Lagereigenschaften zu erhalten (Englisch *et al.*, 2016). Die Vorteile dieser Aufbereitungsform sind u.a. (Englisch *et al.*, 2016; Bück und Tsotsas, 2016; Kröger *et al.*, 2016):

- eine hohe volumetrische Energiedichte und damit verbunden logistische Vorteile,
- günstige Fließ- und Dosiereigenschaften,
- ein geringer Wassergehalt und dadurch eine hohe Lagerstabilität,

- die Reduzierung von Umweltbelastungen durch verringerte Schadgas- und Geruchsemissionen,
- die Möglichkeit zum Export von Nährstoffen aus Nährstoffüberschussregionen und damit die Einhaltung düngemittelrechtlicher Vorgaben,
- die Möglichkeit zur Verwendung von Zuschlagstoffen, welche die physikalischen und/o-der chemischen Eigenschaften des Endproduktes positiv beeinflussen und
- eine geringere Staubentwicklung beim Schütten oder Umladen.

Bei der Pelletierung entstehen unter Druck in Presskanälen stark verdichtete zylinderförmige Pellets unterschiedlicher Länge, die an den beiden Enden schroffe Abbruchkanten aufweisen (Englisch *et al.*, 2016). Durch den hohen Druck und die Reibung im Presskanal erhitzt sich das Material auf bis 95 °C (Döring, 2011).

Während der Agglomeration kann Wärme eingesetzt werden, wenn dies zur Ausbildung von Bindungen zwischen einzelnen Partikeln beiträgt (Bück und Tsotsas, 2016). Dies ist jedoch anders als bei der Produktion von Pellets nicht zwingend Bestandteil des Herstellungsprozesses. Der Zusammenhalt der einzelnen Biomassepartikel innerhalb des Pelletkörpers oder Agglomerats entsteht durch vielfältige, oft gleichzeitig auftretende Bindemechanismen, die wie folgt unterschieden werden können:

- Flüssigkeitsbrücken: Diese Art der Verbindung beruht auf viskosen und kapillaren Kräften (d.h. Adhäsions- und Kohäsionskräfte) und hängt von der Viskosität und Oberflächenspannung der jeweiligen Flüssigkeit ab. Eine eher niedrig viskose Flüssigkeit, die häufig als Bindemittel natürlich im Material vorkommt, ist Wasser (Döring, 2011). Ein Beispiel für ein eher hoch viskoses Bindemittel, das während der Pelletierung zugesetzt werden kann, ist Melasse (Englisch *et al.*, 2016). Flüssigkeitsbrücken sind sehr häufig bei Agglomeraten, da diese meist den Zusatz eines Bindemittels erfordern (Coucoulas, 2003), welches während des Agglomerationsvorganges aufgesprüht oder zur Ausgangsmischung zugegeben wird. Kapillare Kräfte tragen vor allem bei Agglomeraten häufig zur Bindung zwischen den Partikeln bei (Bück und Tsotsas, 2016).
- Feststoffbrücken: Feststoffbrücken werden zwischen zwei Partikeln aus einem Feststoff aufgebaut. Es ist zwischen Sinter- bzw. Schmelzbrücken und Brücken aus auskristallisierenden Feststoffen zu unterscheiden. Eine typische Schmelzbrücke in Pellets aus Biomasse ist geschmolzenes und wieder ausgehärtetes Lignin, bei dem sich aufgrund der hohen Temperaturen während des Pressvorgangs aufschmelzende Polymerketten an die angrenzenden Biomassepartikel binden und diese beim Abkühlen des Materials fest verkleben. Eine Brückenbildung durch Auskristallisation kann z.B. durch Stärkekörner erfolgen, welche in Anwesenheit von Wasser aufquellen, bei steigenden Temperaturen aufplatzen und einzelne Biomassepartikel durch Flüssigkeitsbrücken verkleistern. Diese Brücken härten während einer anschließenden Trocknung aus und bilden stabile Feststoffbrücken (Englisch *et al.*, 2016; Döring, 2011).

- **Formschlüssige Verbindungen:** Diese Art von Verbindung erfolgt durch Verhaken, Verfilzen, Verflechten, Falzen, Falten und ähnliche mechanische Prozesse während des Pressens bzw. während des Mischvorgangs bei der Agglomeration und hängt maßgeblich von der Faserstruktur, Korngröße und Oberflächenrauigkeit des Materials ab, welche z.B. durch die eingesetzte Zerkleinerungstechnik vor dem Pelletiervorgang beeinflusst werden können (Englisch *et al.*, 2016; Bück und Tsotsas, 2016).

Agglomerate sind im Vergleich zu Pellets bei gleichem Ausgangsmaterial in der Regel weniger stark verdichtet und deswegen leichter. Außerdem weisen sie meist größere Poren auf und sind eher in der Lage, Wasser aufzunehmen und in Flüssigkeiten in ihre Bestandteile zu zerfallen (Bück und Tsotsas, 2016; Coucoulas, 2003).

In Deutschland wird bisher vor allem die Presspelletierung als Aufbereitungsweg für getrocknete Gärreste genutzt, um die Transportwürdigkeit und Lagerfähigkeit zu erhöhen und zusätzliche Vermarktungsmöglichkeiten zu erschließen (Schloz und Pelz, 2012; Kirsch, 2010). Damit sollen Wege geschaffen werden, um die teils hohe Nährstoffbelastung in einigen Regionen Deutschlands durch Export von Gärresten zu verringern (Rolink, 2013; Kröger *et al.*, 2016). Die Pellets können als Dünge- oder Heizmittel oder als Einstreu vermarktet werden (Wetter und Brüggling, 2006; Kröger *et al.*, 2016). Die Anzahl der Biogasanlagen, die Gärreste zu hochwertigen Düngeprodukten aufbereiten, ist bislang noch gering (Rolink, 2013). Es wird allerdings damit gerechnet, dass Biogasanlagenbesitzer aufgrund der zu erwartenden Verschärfung der Düngemittel-Gesetzgebung für die anfallenden Gärreste zunehmend Aufbereitungsformen mit überregionalen Vermarktungsmöglichkeiten erschließen werden (Kröger *et al.*, 2016).

### 1.2.3 Wertgebende Eigenschaften

Durch die Erzeugung von Biogas wird ein Teil der organischen Substanz des Ausgangssubstrates abgebaut. Der Trockensubstanz- und Kohlenstoffgehalt werden reduziert, während die Mikro- und Makronährstoffe vollständig im Gärrest verbleiben, wodurch ihre Gehalte relativ erhöht werden. Darüber hinaus wird durch die Abbauprozesse ein Teil des organisch gebundenen Stickstoffes zu Ammoniumstickstoff ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) umgewandelt (d. h. mineralisiert) und ist dadurch direkt pflanzenverfügbar. Auch beim Phosphor wird der organisch gebundene Anteil durch den Fermentationsprozess reduziert, so dass dieser in Form von leicht löslichen Phosphaten vorliegt (Dieckmann *et al.*, 2016).

Während der Kompostierung werden allerdings zuvor mineralisierte Nährstoffe und ein Großteil der organischen Substanz in stabile Huminstoffe überführt. Durch den Abbau der organischen Substanz und durch Trocknung kommt es zu Wasser- und Kohlenstoffverlusten (in Form von Wasserdampf, Sickerwasser und Kohlenstoffdioxid), die einen Masseverlust von bis zu 60 % bewirken können (Förtsch und Meinholz, 2015). Stickstoff aus organischen Verbindungen wird zwar häufig zunächst zu Ammoniumstickstoff umgewandelt, anschließend aber von den an der Rotte beteiligten Mikroorganismen direkt assimiliert oder über Nitrit zu Nitrat oxidiert (Kranert und Cord-Landwehr, 2010). Vor allem der Gehalt an leicht pflanzenverfügbarem Stickstoff ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) fällt in

kompostierten Produkten deshalb in der Regel gering aus (unter 5 %), während er in flüssigen Gärresten bis zu 65 % des Gesamtstickstoffs ausmacht (Fricke *et al.*, 2015). Auch die kurzfristige Verfügbarkeit von Phosphor wird durch die Kompostierung etwas eingeschränkt. Langfristig ist jedoch das gesamte enthaltene Phosphat voll verfügbar und anrechenbar. Kalium ist in frischen wie auch in kompostierten Gärresten weitgehend löslich und damit als voll pflanzenverfügbar anzusehen (Fricke *et al.*, 2015). Die beschriebenen Umwandlungsprozesse senken die unmittelbare Düngewirkung von Kompostprodukten. Die gebildeten Huminstoffe sind jedoch entscheidend für andere wesentliche Qualitätsmerkmale von Kompost wie Wasser- und Nährstoffspeichervermögen, Erhöhung der Kationenaustauschkapazität und die Fähigkeit zur Verklebung von Bodenpartikeln zu stabilen Aggregaten (Kranert und Cord-Landwehr, 2010; Walker *et al.*, 2003; Trumbore, 1997).

Die wichtigste wertgebende Komponente der meisten Komposte, und damit auch der kompostierten Gärreste, ist somit die organische Substanz, die zur Erhöhung bzw. zum Erhalt der Bodenfruchtbarkeit beitragen kann. Hinzu kommen zum Teil nicht unerhebliche Gehalte an Nährstoffen und die in der Regel alkalische Wirkung der Komposte nach der Ausbringung (Bardos, 2004). Die pH-Werte von Gärresten wie auch von Komposten liegen in der Regel über 7, da während der Vergärung und der Kompostierung organische Säuren abgebaut und alkalisch wirkende Salze und Ammoniak aus der organischen Substanz freigesetzt werden (Fricke *et al.*, 2015; Kranert und Cord-Landwehr, 2010).

Nach Kranert und Cord-Landwehr (2010) lassen sich für kompostierte Produkte folgende allgemeine Qualitätsanforderungen formulieren:

- hygienische Unbedenklichkeit
- Eignung im vorgesehenen Anwendungsbereich
- Gesamtgehalt an Fremdstoffen mit mehr als 2 mm Durchmesser (z.B. Kunststoff, Glas, Metall) von unter 0,5 Gewichtsprozent der Trockensubstanz, wobei bei mehr als 0,1 Gewichtsprozent die Flächensumme der Fremdstoffe (z.B. Folien) nicht mehr als 25 cm<sup>2</sup> je Liter Substrat betragen darf.
- niedrige Gehalte an potentiellen Schadstoffen, d.h. z.B. Einhaltung der Grenzwerte für Schwermetalle gemäß BioAbfV
- bekannter Gehalt an wertgebenden Inhaltsstoffen
- ansprechender Gesamteindruck
- gleich bleibende Produktqualität und Lagerfähigkeit.

Für einen pflanzenbaulichen Einsatz der Gärreste aus der Bioabfallvergärung ist eine genaue Kenntnis der jeweiligen Zusammensetzung und Nährstoffgehalte unabdingbar. Diese hängt erheblich von der Beschaffenheit des Ausgangsmaterials ab. Der biologisch abbaubare Anteil im Abfall setzt sich aus mehreren Fraktionen zusammen, zu denen vor allem Küchen- und Gartenabfälle, Papier und Pappe, Altholz sowie Windeln und andere Hygienepapiere gehören (Fricke *et al.*, 2015; Thrän *et al.*, 2016). In Bezug auf die Zusammensetzung der Abfälle und die damit ver-

bundene Gasausbeute ist eine deutliche Saisonabhängigkeit festzustellen. In den Wintermonaten, während denen der Abfall aus Privathaushalten hauptsächlich aus Küchenabfällen besteht, steigt die Gasausbeute bis zum Faktor 1,9 gegenüber den laubreichen Sommermonaten, in denen sich der Großteil des Bioabfalls aus Grünschnitt und Gartenabfällen zusammensetzt (Fricke *et al.*, 2015). In gleichem Maße schwankt auch der Gehalt an Pflanzennährstoffen und organischer Substanz in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Ausgangsmaterials und des zugeführten Strukturmaterials. Desweiteren muss zwischen festen, flüssigen und kompostierten Gärresten unterschieden werden, da die Aufbereitung einen erheblichen Einfluss auf die Zusammensetzung und die Nährstoffgehalte hat. Flüssige Gärreste weisen z.B. in der Regel doppelt bis dreifach höhere Stickstoff- und Kaliumgehalte auf als feste Gärreste (Fricke *et al.*, 2015).

#### 1.2.4 Probleme

Frische Gärreste und unbehandelte frische Komposte aus Bioabfällen sind in der Regel zu nass, um direkt ausgebracht zu werden. Außerdem können sie volatile Fettsäuren, Ethylenoxid oder größere Mengen an Ammonium enthalten, die phytotoxisch wirken können, sowie Unkrautsamen und Krankheitserreger, welche durch eine weitere Aufbereitung abgetötet werden müssen (KiyasudeenS *et al.*, 2016; Bardos, 2004; Wong, 1985; Tiquia, 2010). Ein generelles Problem bei der Verarbeitung von Bioabfällen sind zudem inerte Beimengungen aus Plastik, Glas oder anderen Reststoffen.

Supermarktabfälle sind zum Beispiel häufig noch verpackt, während Kantinen- und Cateringabfälle zum Teil Reste von Plastikgeschirr oder große Mengen an Knochen enthalten (Strippel *et al.*, 2016). Problematisch sind aber vor allem Bioabfälle aus privaten Haushalten, da ihre Reinheit erheblich von der Bereitschaft einzelner Individuen zur ordentlichen Trennung der Abfälle abhängt (Strippel *et al.*, 2016). Fricke *et al.* (2003) fanden in einer Untersuchung aus dem Jahr 2003 in unbehandeltem Bioabfall Störstoffgehalte zwischen 1 und 12 % (Tabelle 1). Laut Kranert und Cord-Landwehr (2010) ist selbst bei hoher Trenneffektivität von einem Störstoffgehalt im Bioabfall von über 2 % auszugehen.

Tabelle 1: Störstoffanteil im Bioabfall und Zusammensetzung der Störstoffe (Fricke *et al.*, 2003)

| Störstoffart       | Mittlere Gehalte (%) | Schwankungsbereich (% TM) |
|--------------------|----------------------|---------------------------|
| Gesamtstörstoffe,  | 1,8                  | 1 - 12                    |
| davon: Kunststoffe | 57,0                 | 44 - 88                   |
| Glas               | 9,0                  | 5 - 32                    |
| Metall             | 6,0                  | 4 - 15                    |
| Sonstiges          | 28,0                 | 12 - 58                   |

Vor der Vergärung werden Bioabfälle in der Regel nicht nur mechanisch aus Säcken oder Gebinden gelöst, sondern auch zur Störstoffabscheidung gesiebt, wobei Siebe mit 60 bis 100 mm Maschenweite zum Einsatz kommen (Kranert und Cord-Landwehr, 2010). Ca. 80 % aller Störstoffe besitzen einen Durchmesser von 80 mm oder größer und können so ausgesiebt werden (Förtsch und Meinholz, 2015). Eine vollständige Entfernung aller Störstoffe ist technologisch allerdings nicht möglich (Strippel *et al.*, 2016). Anzustreben ist ein Störstoffgehalt von unter einem Gewichts-

Prozent schon im Sammelgut, da sonst der Aufwand für die Abtrennung der Fremdstoffe stark ansteigt und höhere Mengen an Siebresten anfallen. Siebreste in größeren Mengen müssen kostenpflichtig entsorgt werden. Außerdem geht mit ihnen auch ein Teil der wertgebenden organischen Substanz verloren. Beides zusammen führt dazu, dass die Effizienz und Ausbeute der Bioabfallverwertung leidet. Bei einem Gehalt von mehr als drei Gewichts-Prozent im Ausgangsmaterial ist außerdem davon auszugehen, dass die Qualität der Endprodukte beeinträchtigt wird, weil keine ausreichende Reinheit des Gär- bzw. Kompostproduktes gewährleistet werden kann (Kehres, 2016b).

Problematisch können neben groben Störstoffen auch hohe Gehalte an Schwermetallen sein, die langfristig zu einer Anreicherung im Boden führen können (Weber *et al.*, 2007; Achiba *et al.*, 2009; Déportes *et al.*, 1995). Die Schwermetalle können dabei aus dem Bioabfall selbst bzw. aus anhaftenden Bodenpartikeln stammen (z.B. im Fall von Grünschnitt aus Gärten oder von Straßenrändern) oder durch nicht abbaubare Reststoffe (z.B. Hausstaub, Flaschendeckel, Batterien) eingetragen werden (Bardos, 2004; Veeken und Hamelers, 2002; Huerta-Pujol *et al.*, 2011). Kompostprodukte können auf der anderen Seite aber auch dazu beitragen, die Pflanzenverfügbarkeit von Schwermetallen zu reduzieren, da sie in der Regel alkalisch wirken und Schwermetalle durch die hohen Gehalte an organischer Substanz gebunden werden können (Chu und Wong, 1987). Von besonderer Bedeutung sind in diesem Zusammenhang Humin- und Fulvosäuren, die vor allem Schwermetalle wie Cadmium, Kupfer und Zink binden (O'Dell *et al.*, 2007; Ciecko *et al.*, 2001). Untersuchungen der BTU Cottbus zum Einfluss von Siebung auf die Eigenschaften der Gärprodukte haben dabei gezeigt, dass sich Schwermetalle vor allem in den Feinanteilen des Materials finden, d.h. in der Fraktion < 10 mm (Raab und Knoop, 2015). Dies ist problematisch, weil eine Siebung mit kleiner Maschenweite erforderlich ist, um den Anteil sonstiger Störstoffe auf den von der BioAbfV geforderten Wert von max. 0,5 Masse-% in der TM abzusenken. Andererseits bedeutet eine Siebung mit einer Maschenweite kleiner 10 mm auch, dass ein erheblicher Teil des Ausgangsmaterials mit abgeschieden wird. In Tabelle 2 sind beispielhaft die Ergebnisse einer Siebsortierung und Störstoffanalyse der BTU Cottbus dargestellt. Für die Untersuchung wurde Gärrest aus einem Technikum verwendet, das in einem zweistufigen Perkulationsverfahren Bioabfälle aus Privathaushalten vergärt. Ein Störstoffgehalt von unter 0,5 Masse-% der TM konnte erst durch Siebung bei 5 mm Maschenweite erzielt werden, wodurch jedoch die Ausbeute an Ausgangsmaterial auf unter 30 % reduziert wurde (Knoop *et al.*, 2015).

Tabelle 2: Verbleibende Anteile an Störstoffen und Ausgangsmaterial nach Siebung mit verschiedenen Maschenweiten. Verändert nach Knoop *et al.* (2015)

| Siebgröße (mm) | Verbleibender Anteil des Ausgangsmaterials (%) | Verbleibender Anteil an Störstoffen (%) |
|----------------|--|---|
| 5              | 29,0   | 0,2                                     |
| 10             | 44,3   | 0,7                                     |
| 20             | 63,0   | 0,9                                     |
| 30             | 78,3   | 2,2                                     |
| 40             | 85,0   | 2,9                                     |
| 50             | 88,4   | 3,8                                     |

Häufig ist ein Absieben der Feinfraktion auch technologisch nicht darstellbar, weil aufgrund des hohen Wassergehaltes und der damit verbundenen Anhaftung an größere Bestandteile die Feinfraktion nicht abgetrennt werden kann (Kranert und Cord-Landwehr, 2010). Eine Verringerung der Schwermetallbelastung kann zum Teil durch Magnetscheidung erzielt werden, weil Schwermetalle häufig im Verbund mit Eisenmetallen bzw. Stahl auftreten (Beschichtungen, Verbindungselemente etc.), welche durch Magnetsysteme entfernt werden können (Kranert und Cord-Landwehr, 2010).

Eine weitere Gruppe problematischer Bestandteile von Komposten, insbesondere von solchen aus Bioabfällen, können organische Schadstoffe sein (Déportes *et al.*, 1995). Kupper und Fuchs (2007) fanden zum Beispiel in Gärresten und Komposten aus Bioabfällen in der Schweiz polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), polychlorierte Biphenyle (PCB), polychlorierte Dibenzo-p-dioxine und -furane (PCDD/F), dioxin-ähnliche PCB (DL PCB), bromierte Flammschutzmittel, perfluorierte Alkyl-Verbindungen (PFAS), Pflanzenschutzmittel (PSM), Phthalate, und chlorierte Paraffine (CP). Die Konzentrationen dieser Stoffe waren dabei in der Regel in Gärresten höher als in Komposten und in Materialien städtischer Herkunft höher als in solchen aus eher ländlichen Gebieten. Eingetragen werden diese Stoffe z.B. durch Beimengungen im Bioabfall, Rückstände von Pflanzenschutzmitteln an Schnittgut oder atmosphärische Deposition. Nicht für alle Vertreter dieser Schadstoffgruppen sind genügend Erfahrungen vorhanden um eine ökotoxikologische Risikoabschätzung anhand von Gehalten vorzunehmen. Tests mit Pflanzen und Bodenorganismen, wie sie in dieser Arbeit vorgenommen wurden, sind deshalb notwendig, um praxisrelevante Empfehlungen bezüglich der Einsetzbarkeit von Gärresten und Komposten aus Bioabfällen geben zu können (Kupper und Fuchs, 2007).



## 2. Beschreibung der Gärprodukte und ihrer Weiterentwicklung

Für die Herstellung der Gärprodukte wurden getrennt gesammelte Bioabfälle eines Abfallentsorgers aus Sachsen verwendet. Diese wurden mit Strukturmaterial (i.d.R. Grünschnitt) im Verhältnis 10:1 vermischt, grob zerkleinert und in einer Biogasanlage der Firma GICON GmbH vergoren (Abbildung 1). Die Vergärung erfolgte in einem zweistufigen Batchprozess im Perkulationsverfahren. Während dieses Verfahrens wird das Ausgangssubstrat in einem Fermenter mit Prozesswasser beregnet, was eine Austragung von organischen Säuren und anderen flüssigen leicht abbaubaren organischen Verbindungen wie Alkoholen und Aldehyden bewirkt. Die eigentliche Biogasproduktion erfolgt in einem getrennten Methanreaktor aus dem Perkolat (Knoop *et al.*, 2015). Während eines Zeitraums von 14-21 Tagen werden so jeweils ca. 40 bis 50 % der organischen Feststoffe zu Biogas umgesetzt (Tietze, 2014).

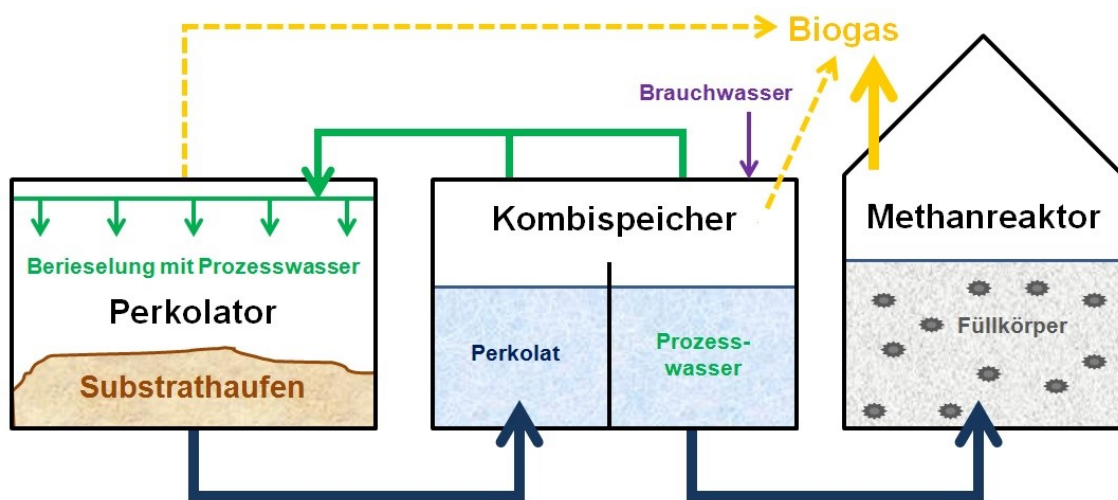


Abbildung 1: Schematische Darstellung des diskontinuierlichen Trockenfermentationsverfahrens mit Perkolation der Firma GICON GmbH (nach Raussen und Kern, 2014)

Bisher spielen Perkulationsverfahren in der Praxis nur eine untergeordnete Rolle (Fricke *et al.*, 2015). Sie bieten jedoch Vorteile, weil auch grobe und störfreie Substrate vergoren werden können (Tietze, 2014). Eine Trennung von Hydrolyse und Methangewinnung ermöglicht zudem eine Anpassung der Prozessbedingungen an die Anforderungen der jeweiligen Mikroorganismen und kann so den Gesamtvorgang effektiver und kürzer gestalten (Friege *et al.*, 2015). Eine Prozesshemmung durch Ansammlung von Säuren oder Ammoniak, die bei einstufigen Verfahren insbesondere bei der Vergärung leicht abbaubarer Abfallstoffe auftreten kann, wird durch zweistufige Verfahren vermieden (Fricke *et al.*, 2015).

Beim GICON-Verfahren erfolgt die Abtrennung und Entnahme der Feststoffe nach der Hydrolyse. Die so gewonnenen festen Gärreste wurden im Rahmen der Produktherstellung einer mehrwöchigen Intensivrotte in offenen Kompostmieten unterzogen, wobei Temperaturen zwischen 50 und 60 °C erzielt wurden (Tietze, 2014). Diese Kompostrotte dient der Hygienisierung des Materials (Einhaltung der Vorgaben durch die BioAbfV) sowie der Trocknung auf einen für die Weiterverarbeitung erforderlichen Trockensubstanzgehalt von über 50 %.

Aus dem kompostierten Gärrest wurden dann durch weitere Aufbereitung vier verschiedene Gärprodukte gewonnen, die im weiteren Verlauf als *Kategorie 1* (ohne Zuschlagstoffe) bezeichnet werden (Abbildung 2):

1. *Feinfraktion*: Kompostierter Gärrest, aus dem durch Siebung (20 mm) grobe Störstoffe sowie ein Großteil des Strukturmaterials entfernt wurden.
2. *Agglomerate*: Hergestellt aus rückbefeuchteter Feinfraktion, aus der in einem rotierenden Mischer mit Pelletierteller runde Agglomerate mit einem Durchmesser von 1 bis 2 cm aufgebaut werden.
3. *Pellets*: Hergestellt aus der Feinfraktion, die mit einem Extruder zerkleinert und durch eine Matrice gepresst wird. Dadurch entstehen Pellets von 20 mm Durchmesser und variierender Länge.
4. *Grobfraktion*: Kompostierter und mittels Extruder zerkleinerter Gärrest, aus dem durch händische Sortierung vor der Zerkleinerung Störstoffe entfernt wurden. Im Gegensatz zur Feinfraktion sind mehr Anteile des Strukturmaterials erhalten.



Abbildung 2: Aufbereitete Gärprodukte (F = Feinfraktion, P = Pellet, A = Agglomerate, G = Grobfraktion) [Foto: Roß]

Insgesamt wurden vier Chargen dieser Gärprodukte hergestellt, wobei der Produktionszeitpunkt der einzelnen Chargen jeweils durch die Ausbringtermine im Feldversuch bestimmt wurde. Die chemischen Eigenschaften und Nährelement- bzw. Schwermetallgehalte dieser Gärprodukte sind in Tabelle 3 dargestellt. Zusätzlich wurden durch die BTU Cottbus verschiedene physikalische Eigenschaften bestimmt (Tabelle 3, Teil 2), darunter auch die Wasseraufnahmefähigkeit und der R-Index, mit dem wasserabweisende Eigenschaften von Bodenpartikeln und organischen Konglomeraten beschrieben werden können (Tillman *et al.*, 1989; Hallett *et al.*, 2003). Die Hydrophobizität organischer Materialien wird vor allem durch Abbauprodukte destruktiver Pilzarten und zurückbleibende Wachsschichten von Blattoberflächen verursacht (Hallett, 2008).

Tabelle 3: Nährelementgehalte, physikalische und chemische Eigenschaften der Gärprodukte der Kategorie 1 (Teil 1)

| Lieferung    | Gärprodukt   | TS (%) | oTS (%) | N <sub>ges</sub> (g kg <sup>-1</sup> ) | NH <sub>4</sub> -N (g kg <sup>-1</sup> ) | C <sub>org</sub> (g kg <sup>-1</sup> ) | C/N-Verhältnis | P (g kg <sup>-1</sup> ) | K (g kg <sup>-1</sup> ) | Ca (g kg <sup>-1</sup> ) | Mg (g kg <sup>-1</sup> ) | S (g kg <sup>-1</sup> ) | pH  |
|--------------|--------------|--------|---------|--|--|--|----------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-----|
| Juni 2014    | Feinfraktion | 74,0   | 53,8    | 21,2                                   | 1,3                                      | 259,9                                  | 12,3           | 3,7                     | 18,0                    | 45,2                     | 5,7                      | 8,1                     | 7,3 |
|              | Agglomerate  | 76,7   | 51,6    | 21,4                                   | 1,2                                      | 256,0                                  | 12,0           | 4,0                     | 18,4                    | 42,7                     | 5,7                      | 13,9                    | 7,5 |
|              | Pellets      | 80,0   | 53,3    | 20,4                                   | 1,7                                      | 286,7                                  | 14,1           | 3,6                     | 17,0                    | 40,1                     | 5,5                      | 9,4                     | 7,1 |
|              | Grobfraktion | 86,4   | 62,6    | 18,0                                   | 1,4                                      | 289,6                                  | 16,1           | 4,0                     | 16,2                    | 45,2                     | 4,3                      | 7,1                     | 7,3 |
| Oktober 2014 | Feinfraktion | 45,5   | 41,3    | 19,4                                   | 1,4                                      | 238,2                                  | 12,3           | 2,9                     | 13,0                    | 23,4                     | 5,2                      | 10,2                    | 7,0 |
|              | Agglomerate  | 58,9   | 26,6    | 10,7                                   | 1,0                                      | 128,9                                  | 13,0           | 2,0                     | 9,6                     | 18,4                     | 4,0                      | 4,0                     | 7,7 |
|              | Pellets      | 47,1   | 43,2    | 17,2                                   | 1,3                                      | 220,0                                  | 12,8           | 2,9                     | 12,8                    | 22,9                     | 5,1                      | 5,7                     | 7,3 |
|              | Grobfraktion | 46,8   | 45,0    | 18,2                                   | 1,4                                      | 258,5                                  | 14,2           | 2,8                     | 12,2                    | 23,4                     | 5,0                      | 6,4                     | 7,2 |
| Juni 2015    | Feinfraktion | 37,7   | 20,5    | 20,9                                   | 1,3                                      | 281,0                                  | 13,5           | 2,7                     | 10,7                    | 32,5                     | 5,4                      | 3,5                     | 7,0 |
|              | Agglomerate  | 37,8   | 19,5    | 21,5                                   | 1,4                                      | 289,4                                  | 13,4           | 2,7                     | 11,4                    | 33,5                     | 5,9                      | 6,5                     | 7,1 |
|              | Pellets      | 37,8   | 19,5    | 21,6                                   | 1,4                                      | 278,8                                  | 12,9           | 2,9                     | 11,5                    | 32,3                     | 5,8                      | 5,1                     | 7,0 |
|              | Grobfraktion | 38,5   | 21,3    | 21,2                                   | 1,4                                      | 293,5                                  | 13,8           | 3,1                     | 11,5                    | 29,4                     | 5,5                      | 3,4                     | 7,4 |
| Oktober 2015 | Feinfraktion | 53,8   | 22,3    | 17,0                                   | 0,8                                      | 209,7                                  | 12,0           | 3,1                     | 12,0                    | 24,0                     | 6,3                      | n.b.                    | 7,2 |
|              | Agglomerate  | 57,7   | 24,8    | 18,4                                   | 1,0                                      | 230,5                                  | 13,0           | 3,0                     | 12,2                    | 22,7                     | 5,5                      | n.b.                    | 7,8 |
|              | Pellets      | 58,9   | 21,9    | 14,8                                   | 0,9                                      | 194,0                                  | 13,0           | 2,8                     | 10,7                    | 22,9                     | 5,7                      | n.b.                    | 7,3 |
|              | Grobfraktion | 57,6   | 25,9    | 19,0                                   | 0,9                                      | 243,9                                  | 13,0           | 3,3                     | 12,5                    | 23,2                     | 5,3                      | n.b.                    | 7,3 |

Werte bestimmt durch BTU Cottbus, ausgenommen Werte in grau hinterlegten Zellen (bestimmt durch IASP).

Tabelle 3: Nährelementgehalte, physikalische und chemische Eigenschaften der Gärprodukte der Kategorie 1 (Teil 2)

| Lieferung    | Gärprodukt   | Schütt-<br>dichte<br>(kg m <sup>-3</sup> ) | Durchmesser<br>Einzelkörper<br>(mm) | R-Index<br>nach<br>Hallett <i>et al.</i> (2003) | Wassergehalt<br>nach<br>24 h Aufsättigung<br>(%) | Anteil Größenfraktionen (in mm) an der Trockenmasse (%) |         |         |        |       |         |       |
|--------------|--------------|--|-------------------------------------|---|--|---|---------|---------|--------|-------|---------|-------|
|              |              |  |                                     |   |  | > 20  | 16 - 20 | 10 - 16 | 6 - 10 | 2 - 6 | 0,6 - 2 | < 0,6 |
| Juni 2014    | Feinfraktion | n.b.                                       | n.b.                                | n.b.  | n.b.   | n.b.  | n.b.    | n.b.    | n.b.   | n.b.  | n.b.    | n.b.  |
|              | Agglomerate  | 638,7                                      | 4,7                                 | 14,1  | n.b.   | n.b.  | n.b.    | n.b.    | n.b.   | n.b.  | n.b.    | n.b.  |
|              | Pellets      | 515,7                                      | 17,5 * 45,6                         | 16,5  | n.b.   | n.b.  | n.b.    | n.b.    | n.b.   | n.b.  | n.b.    | n.b.  |
|              | Grobfraktion | 311,4                                      | n.b.                                | 10,6  | n.b.   | n.b.  | n.b.    | n.b.    | n.b.   | n.b.  | n.b.    | n.b.  |
| Oktober 2014 | Feinfraktion | 398,7                                      | n.b.                                | 3,1   | n.b.   | 0,0   | 0,0     | 0,3     | 34,3   | 52,4  | 6,0     | 7,0   |
|              | Agglomerate  | 629,2                                      | 6,2                                 | 8,7   | 40,4   | 0,0   | 0,0     | 5,0     | 18,7   | 72,3  | 3,6     | 0,4   |
|              | Pellets      | 439,7                                      | 23,7 * 49,0                         | 4,1   | n.b.   | 88,2  | 5,9     | 2,0     | 0,8    | 1,3   | 1,2     | 0,7   |
|              | Grobfraktion | 346,9                                      | n.b.                                | n.b.  | n.b.   | n.b.  | n.b.    | n.b.    | n.b.   | n.b.  | n.b.    | n.b.  |
| Juni 2015    | Feinfraktion | 424,8                                      | n.b.                                | n.b.  | n.b.   | 0,0   | 1,8     | 4,7     | 15,8   | 51,6  | 16,3    | 9,8   |
|              | Agglomerate  | 345,7                                      | 23,1                                | 9,9   | 49,1   | 48,0  | 21,1    | 20,9    | 5,4    | 2,9   | 0,9     | 0,7   |
|              | Pellets      | 339,2                                      | 21,1 * 36,1                         | 5,8   | 48,8   | 73,5  | 10,5    | 6,3     | 2,5    | 4,4   | 1,8     | 1,0   |
|              | Grobfraktion | 294,6                                      | n.b.                                | n.b.  | n.b.   | n.b.  | n.b.    | n.b.    | n.b.   | n.b.  | n.b.    | n.b.  |
| Oktober 2015 | Feinfraktion | 468,1                                      | n.b.                                | 2,8   | 60,2   | 0,0   | 0,0     | 1,1     | 7,9    | 43,4  | 23,1    | 24,5  |
|              | Agglomerate  | 623,6                                      | 5,0                                 | 3,2   | 49,4   | 0,0   | 0,0     | 0,0     | 5,9    | 87,4  | 5,6     | 1,1   |
|              | Pellets      | 482,9                                      | 19,2 * 44,3                         | 2,3   | 48,9   | 27,3  | 70,3    | 2,1     | 0,0    | 0,1   | 0,1     | 0,2   |
|              | Grobfraktion | 457,3                                      | n.b.                                | n.b.  | 54,1   | n.b.  | n.b.    | n.b.    | n.b.   | n.b.  | n.b.    | n.b.  |

Werte bestimmt durch BTU Cottbus (Knoop, 2016).

Ein R-Index von eins bedeutet, dass keinerlei Hydrophobizität vorliegt (Hallett *et al.*, 2003). Werte größer eins deuten auf die Anwesenheit wasserabweisender Eigenschaften hin und ermöglichen einen Vergleich verschiedener Proben untereinander.

Die Inhaltsstoff- und Trockensubstanzgehalte der Gärprodukte schwanken von Lieferung zu Lieferung aufgrund der wechselnden Zusammensetzung des Ausgangsmaterials und der äußeren Begleitumstände wie z.B. der Witterung während der Kompostierung. Vor allem in der dritten Lieferung vom Juni 2015 waren die Trockensubstanzgehalte vergleichsweise niedrig, was auch die weitere Aufbereitung erschwerte. Deutlich wird dies an den stark abweichenden Größen der Agglomerate, die in der dritten Lieferung zu 70 % einen Durchmesser von 16 mm oder mehr besaßen, während sonst 100 % aller Agglomerate kleiner als 16 mm waren (vergleiche Tabelle 3, Teil 2). Dies ist zumindest zum Teil der Produktion im Modellmaßstab geschuldet. Bei einer Produktion in industriellen Größenordnungen wäre vermutlich von einer größeren Homogenität des Materials und geringerem Witterungseinfluss auszugehen.

#### Gehalte an Schwermetallen und Störstoffen

Laut Bioabfallverordnung (BioAbfV, 2013) darf die Gesamtmenge an Bioabfällen, die innerhalb von drei Jahren pro Hektar ausgebracht wird, in Abhängigkeit vom Schwermetallgehalt 30 t (Typ 1) bzw. 20 t (Typ 2) Trockenmasse nicht überschreiten. Bei den Gärprodukten der Kategorie 1 wurden für einzelne Schwermetalle die strengeren Grenzwerte für eine Ausbringung von 30 t TM in allen Chargen überschritten (Tabelle 4).

Tabelle 4: Schwermetall- und Störstoffgehalte der Gärprodukte der Kategorie 1 und entsprechende Grenzwerte gemäß BioAbfV. Überschreitungen der Grenzwerte sind gelb (für 30 t ha<sup>-1</sup> TM in drei Jahren) bzw. rot (für 20 t ha<sup>-1</sup> TM in drei Jahren) markiert.

| Lieferung                | Gärprodukt                        | Pb                  | Cd  | Cr    | Cu    | Ni   | Zn    | Störstoffe |
|--------------------------|-----------------------------------|---------------------|-----|-------|-------|------|-------|------------|
|                          |                                   | mg kg <sup>-1</sup> |     |       |       |      |       | % der TM   |
| Juni 2014                | Feinfraktion                      | 101,1               | 0,9 | 27,0  | 42,4  | 14,5 | 285,3 | 1,0        |
|                          | Agglomerate                       | 61,9                | 0,4 | 49,3  | 38,3  | 25,5 | 353,8 |            |
|                          | Pellets                           | 48,9                | 0,3 | 38,6  | 36,6  | 19,8 | 248,7 |            |
|                          | Grobfraktion                      | 39,8                | 0,3 | 75,4  | 30,1  | 34,2 | 218,6 |            |
| Oktober 2014             | Feinfraktion                      | 107,4               | 1,0 | 42,4  | 45,2  | 21,7 | 250,2 | 0,9        |
|                          | Agglomerate                       | 310,8               | 0,8 | 31,9  | 35,6  | 17,1 | 213,1 |            |
|                          | Pellets                           | 180,7               | 1,2 | 70,2  | 140,2 | 32,2 | 263,5 |            |
|                          | Grobfraktion                      | 127,6               | 1,2 | 62,9  | 46,3  | 29,7 | 277,2 |            |
| Juni 2015                | Feinfraktion                      | 93,2                | 2,6 | 32,1  | 54,1  | 15,3 | 376,6 | 1,3        |
|                          | Agglomerate                       | 160,1               | 2,9 | 38,8  | 88,2  | 19,2 | 392,0 |            |
|                          | Pellets                           | 94,7                | 2,6 | 47,2  | 64,7  | 23,6 | 348,4 |            |
|                          | Grobfraktion                      | 96,5                | 2,2 | 74,7  | 55,1  | 32,6 | 327,3 |            |
| Oktober 2015             | Feinfraktion                      | 98,8                | 0,4 | 40,2  | 47,3  | 19,4 | 334,7 | 0,1        |
|                          | Agglomerate                       | 100,7               | 0,7 | 40,5  | 45,9  | 20,7 | 344,7 |            |
|                          | Pellets                           | 103,5               | 0,6 | 54,4  | 39,2  | 24,9 | 321,7 |            |
|                          | Grobfraktion                      | 90,5                | 0,7 | 37,7  | 48,2  | 17,7 | 353,7 |            |
| Grenzwerte gemäß BioAbfV | 20 t ha <sup>-1</sup> in 3 Jahren | 150,0               | 1,5 | 100,0 | 100,0 | 50,0 | 400,0 | 0,5        |
|                          | 30 t ha <sup>-1</sup> in 3 Jahren | 100,0               | 1,0 | 70,0  | 70,0  | 35,0 | 300,0 |            |

Werte bestimmt durch BTU Cottbus (Knoop, 2016).

In den Lieferungen vom Oktober 2014 und Juni 2015 konnten teilweise sogar die weniger strengen Grenzwerte für eine Ausbringung von 20 t TM in drei Jahren nicht eingehalten werden. Die Störstoffgehalte, d.h. die Anteile insbesondere von Glas, Kunststoff und Metall mit einem Durchmesser von mehr als 2 mm, dürfen 0,5 % der Trockenmasse nicht übersteigen (BioAbfV, 2013). Der Anteil an derartigen Fremdstoffen wurde jeweils für die Feinfraktion bestimmt, die Ausgangsmaterial für die Agglomerate und Pellets ist (Knoop, 2016). Obwohl diese Gärreste vor der Weiterverarbeitung gesiebt wurden, konnten die geforderten Grenzwerte für Störstoffe nur in der vierten Lieferung eingehalten werden.

#### Weiterentwicklung durch Zugabe von Zuschlagstoffen (Gärprodukte der Kategorie 2)

Die ursprüngliche Idee des Projektes, in dessen Rahmen diese Arbeit angefertigt wurde, war es, aus den bei der energetischen Nutzung von Bioabfällen entstehenden Gärresten ein lagerfähiges, transportwürdiges und vor allem marktfähiges Produkt herzustellen, das als Düngemittel in der Landwirtschaft zur Anwendung kommen und in den Nährstoffkreislauf eingebracht werden könnte. Basierend auf den Ergebnissen der ersten Versuche und der Produktcharakterisierung der BTU Cottbus wurde Anfang 2015 eine Weiterentwicklung der bestehenden Produkte vorgenommen, mit der zwei wesentliche Ziele erreicht werden sollten:

1. Erhöhung des Anteils an pflanzenverfügbaren Nährstoffen, insbesondere an Stickstoff.
2. Verbesserung der Wasseraufnahme und damit schnellerer Zerfall der Produkte im Boden und zügigere Freisetzung der enthaltenen Nährstoffe.

Als Produkte mit der größten Praxistauglichkeit waren bis zu diesem Zeitpunkt die Agglomerate identifiziert worden, da sie auf Grund ihrer Größe und Form am ehesten mit herkömmlichen Düngestreuern ausgebracht werden könnten und gut schütt- und lagerfähig sind. Zudem war der Düngeeffekt der Agglomerate in den bis zu diesem Zeitpunkt erfolgten Versuchen größer als bei den Pellets. Die Produktoptimierung wurde deshalb ausschließlich mit den Agglomeraten durchgeführt und erfolgte durch Zugabe verschiedener Zuschlagstoffe. Die Erhöhung der Stickstoffgehalte wurde durch Zugabe von Tiermehl („TM“; 14 % N<sub>ges</sub>, davon 70 % direkt pflanzenverfügbar) bzw. Kalkammonsalpeter („KAS“; 26 % N<sub>ges</sub>, davon 100 % direkt pflanzenverfügbar) realisiert. Angestrebt wurden Gehalte an pflanzenverfügbarem Stickstoff von drei bzw. fünf Prozent. Die Unterschiede im angestrebten N-Gehalt waren durch physikalische Eigenschaften der Zuschlagstoffe bedingt. Bei Tiermehl musste die zuzugebende Menge begrenzt werden, da die Mischung sonst verschmierte und eine Agglomeratbildung nicht möglich war. Für die Verbesserung der Infiltration wurden Tonminerale (Bentonit) bzw. Strohhacksel zugegeben. Die Herstellung dieser Gärprodukte der Kategorie 2 (Abbildung 3) erfolgte durch die BTU Cottbus im labortechnischen Maßstab, weshalb in der Folge nur bestimmte Analysen und Versuchsreihen mit diesen neuen Produkten wiederholt werden konnten.





Abbildung 3: Weiterentwickelte Gärprodukte - Agglomerate aus Gärresten aus Bioabfällen (=„AggloGr“) mit den Zuschlagstoffen Kalkammonsalpeter (= „KAS“), Tiermehl (= „TM“), Ton und Stroh [Foto: Roß]

Die Mischungsverhältnisse und die angestrebten Stickstoffgehalte der Gärprodukte der Kategorie 2 sind in Tabelle 5 dargestellt. Aufgrund von Verlusten während der Herstellung und anschließenden Lagerung und bedingt durch die Inhomogenität des Bioabfall-Gärrestes weichen die Stickstoffgehalte in den Endprodukten von den angestrebten Gehalten ab. Die tatsächlichen Nährrelementgehalte sowie ausgewählte chemische und physikalische Eigenschaften sind in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 5: Mischungsverhältnisse und angestrebte N-Gehalte der Gärprodukte der Kategorie 2 mit den Zuschlagstoffen Kalkammonsalpeter (= „KAS“), Tiermehl (= „TM“), Ton und Stroh

| Variante              | Menge Gärrest (%) | Zuschlagstoff „A“ | Anteil „A“ (% TM) | Zuschlagstoff „B“ | Anteil „B“ (% TM) | Angestrebter Gehalt (% TM) |                  |
|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|------------------|
|                       |                   |                   |                   |                   |                   | N <sub>verf.</sub>         | N <sub>ges</sub> |
| AggloGr               | 100,0             | -                 | -                 | -                 | -                 | 0,0                        | 1,7              |
| AggloGr + TM          | 70,2              | Tiermehl          | 29,8              | -                 | -                 | 3,0                        | 5,5              |
| AggloGr + TM + Ton    | 40,2              | Tiermehl          | 29,8              | Ton               | 30,0              | 3,0                        | 5,0              |
| AggloGr + TM + Stroh  | 60,2              | Tiermehl          | 29,8              | Stroh             | 10,0              | 3,0                        | 5,3              |
| AggloGr + KAS         | 81,5              | KAS               | 18,5              | -                 | -                 | 5,0                        | 6,4              |
| AggloGr + KAS + Ton   | 51,5              | KAS               | 18,5              | Ton               | 30,0              | 5,0                        | 5,9              |
| AggloGr + KAS + Stroh | 71,5              | KAS               | 18,5              | Stroh             | 10,0              | 5,0                        | 6,2              |

Zuschlagstoffe: „A“ dient der Erhöhung der N-Gehalte, „B“ soll die Infiltration verbessern.

Tabelle 6: Nährelementgehalte, chemische und physikalische Eigenschaften der Gärprodukte der Kategorie 2 (mit Zuschlagstoffen).

| Gärprodukt            | TS (%) | oTS (%) | N <sub>ges</sub> (g kg <sup>-1</sup> ) | NH <sub>4</sub> -N (g kg <sup>-1</sup> ) | C <sub>org</sub> (g kg <sup>-1</sup> ) | C/N-Verhältnis | P                     | K   | Ca   | Mg   | S   |
|-----------------------|--------|---------|--|--|--|----------------|-----------------------|-----|------|------|-----|
|                       |        |         |  |  |  |                | (g kg <sup>-1</sup> ) |     |      |      |     |
| AggloGr               | 84,3   | 26,9    | 11,2                                   | 0,8                                      | 144,7                                  | 12,9           | 2,2                   | 7,6 | 20,4 | 4,5  | 1,5 |
| AggloGr + TM          | 89,5   | 46,1    | 45,0                                   | 2,9                                      | 243,2                                  | 5,4            | 2,0                   | 8,0 | 15,3 | 4,2  | 1,6 |
| AggloGr + TM + Ton    | 94,6   | 37,2    | 34,6                                   | 2,8                                      | 182,4                                  | 5,3            | 1,6                   | 6,8 | 18,6 | 6,1  | 1,2 |
| AggloGr + TM + Stroh  | 93,9   | 52,6    | 52,4                                   | 3,1                                      | 272,0                                  | 5,2            | 2,1                   | 9,3 | 13,3 | 3,1  | 1,5 |
| AggloGr + KAS         | 91,2   | 36,5    | 49,4                                   | 23,5                                     | 120,0                                  | 2,4            | 1,7                   | 6,7 | 24,0 | 8,1  | 1,8 |
| AggloGr + KAS + Ton   | 86,0   | 30,2    | 59,5                                   | 24,8                                     | 81,5                                   | 1,4            | 1,1                   | 5,4 | 29,6 | 13,6 | 1,3 |
| AggloGr + KAS + Stroh | 95,5   | 38,6    | 52,4                                   | 22,0                                     | 142,2                                  | 2,7            | 1,9                   | 7,0 | 23,0 | 8,4  | 1,7 |

| Gärprodukt            | pH  | Pb                     | Cd  | Cr   | Cu   | Ni   | Zn    | Schüttdichte (kg m <sup>-3</sup> ) | Durchmesser Einzelkörper (mm) | R-Index |
|-----------------------|-----|------------------------|-----|------|------|------|-------|------------------------------------|-------------------------------|---------|
|                       |     | (mg kg <sup>-1</sup> ) |     |      |      |      |       |                                    |                               |         |
| AggloGr               | 6,9 | 52,3                   | 0,6 | 55,4 | 22,2 | 38,0 | 163,5 | 656,8                              | 9,1                           | 10,4    |
| AggloGr +TM           | 6,4 | 41,6                   | 0,4 | 37,3 | 15,3 | 26,0 | 282,6 | 678,1                              | 10,3                          | n.b.    |
| AggloGr + TM + Ton    | 7,0 | 24,2                   | 0,4 | 29,4 | 3,9  | 14,5 | 89,7  | 764,5                              | 12,0                          | 5,3     |
| AggloGr + TM + Stroh  | 6,3 | 19,8                   | 0,3 | 38,1 | 11,4 | 27,7 | 107,1 | 475,8                              | 13,4                          | 8,0     |
| AggloGr + KAS         | 6,8 | 46,2                   | 0,5 | 64,0 | 12,0 | 43,3 | 138,3 | 733,1                              | 8,8                           | 6,1     |
| AggloGr + KAS + Ton   | 7,0 | 29,3                   | 0,4 | 19,7 | 4,6  | 14,9 | 90,2  | 805,3                              | 7,6                           | 4,0     |
| AggloGr + KAS + Stroh | 6,2 | 49,9                   | 0,4 | 48,3 | 16,3 | 33,7 | 127,0 | 401,7                              | 13,5                          | 3,5     |

Werte in grau hinterlegten Zellen bestimmt durch BTU Cottbus



### 3. Wirkungen von kompostierten Gärprodukten aus Bioabfällen auf boden-ökologische Parameter sowie auf Wachstum, Entwicklung und Ertragsbildung von Kulturpflanzen

#### 3.1 Kohlenstoffmineralisierung

Die ersten Stadien des Abbaus organischer Substanz im Boden umfassen die Verringerung der Partikelgröße und die schnelle Umsetzung der leicht abbaubaren Fraktionen durch Bodenorganismen. Während dieses Prozesses werden CO<sub>2</sub> und anorganische Verbindungen wie Ammonium, Phosphat und Sulfat freigesetzt, während schwer abbaubare bzw. stabilisierte organische Verbindungen im Boden akkumulieren (Huang und Hardie, 2009). Kompostierungs- und Vergärungsverfahren werden zur Behandlung von Bioabfällen eingesetzt, um unter anderem eine weitgehende Stabilisierung der organischen Substanz durch mikrobiellen Abbau zu erreichen (Hupe und Stegmann, 1998). Die Menge an leicht verfügbarem Kohlenstoff ist in Gärresten entsprechend gering, während stabile Verbindungen wie Lignin verhältnismäßig viel enthalten sind (Chen *et al.*, 2012). Die Abbaugeschwindigkeit insbesondere von kompostierten Gärresten ist aufgrund der geringen Mengen an leicht verfügbarem Kohlenstoff in der Regel geringer als bei anderen organischen Materialien wie z.B. Maisstroh (Chen *et al.*, 2012).

Durch Bestimmung der so genannten Bodenatmung, d.h. der CO<sub>2</sub>-Freisetzung aus Böden, kann die Kohlenstoffmineralisierung und damit die metabolische Aktivität von Mikroorganismen im Boden erfasst werden (Eisenträger *et al.*, 1998; Ottow, 2011). Im Freiland ist dies jedoch aufwendig, da die mikrobielle Respiration u.a. vom physiologischen Zustand der Mikroorganismen, der Feuchtigkeit und Struktur des Bodens, der Temperatur und der Nährstoffversorgung abhängt und somit witterungsbedingt saisonalen und tageszeitlichen Schwankungen unterliegt (Eisenträger *et al.*, 1998; Trumbore, 1997; Blume *et al.*, 2010). Außerdem tragen neben Mikroorganismen auch die Bodenmakrofauna und die Pflanzenwurzeln zur CO<sub>2</sub>-Freisetzung bei, was entsprechende mathematische Korrekturen erfordert (Blume *et al.*, 2010; Bermejo Domínguez, 2012; Trumbore, 1997). Inkubationsversuche im Labor erlauben dagegen die alleinige Messung der durch mikrobiellen Abbau verursachten CO<sub>2</sub>-Freisetzung (Trumbore, 1997). Unterschiede hinsichtlich der Abbaubarkeit verschiedener organischer Materialien können ebenso bestimmt werden wie mögliche toxische Wirkungen von Testsubstraten, wobei eine Hemmung der mikrobiellen Bodenatmung auf dem teilweisen Absterben der Population oder auf der Beeinträchtigung von Stoffwechselleistungen beruhen kann, welche z. B. durch organische Schadstoffe und Schwermetalle verursacht werden (Blume *et al.*, 2010). Die Messung der Bodenatmung ermöglicht somit unter anderem die Einschätzung der Auswirkung von Nährstoffdosierung bzw. Düngung und der ökotoxikologischen Wirkung von Chemikalien, kontaminierten Böden u.ä. (Eisenträger *et al.*, 1998).

### 3.1.1 Zielstellung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Inkubationsversuche zur Messung der Bodenatmung mit einer Dauer von jeweils 100 Tagen durchgeführt. Damit sollten Unterschiede zwischen den verschiedenen aufbereiteten Produkten hinsichtlich der Abbaugeschwindigkeit im Boden untersucht werden. Außerdem sollte durch Vergleiche mit unbehandeltem Boden eine mögliche Toxizität der Bioabfallprodukte überprüft werden.

### 3.1.2 Material und Methoden

Die Laborversuche wurden unter kontrollierten Bedingungen (konstante Temperatur, konstanter Wassergehalt, kein Pflanzenbewuchs) in einem Bodenatmungsmessgerät (CarbO<sub>2</sub>Bot®) der Firma prw electronics (Deutschland) durchgeführt. Die Inkubation erfolgt bei diesem Gerät in 200 ml-Gefäßen, in die jeweils 40 g Boden und die gewünschte Menge an Substrat gefüllt werden. Freigesetztes CO<sub>2</sub> wird in einer wässrigen Lösung von Kaliumhydroxid (0,6 mol l<sup>-1</sup>) aufgefangen, die in einem Gefäß oberhalb des Bodens eingesetzt wird (Abbildung 4). Durch die Aufnahme von CO<sub>2</sub> sinkt die elektrische Leitfähigkeit der KOH-Lösung.

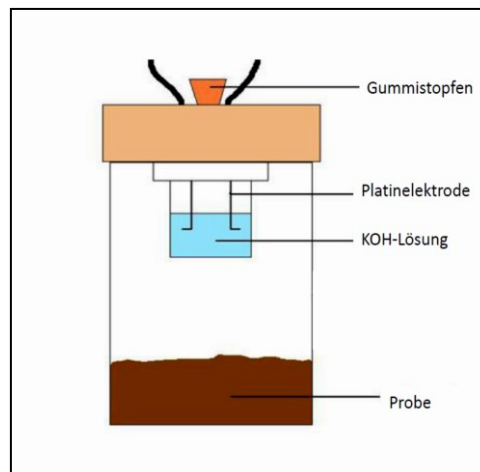


Abbildung 4: Aufbau der Gefäße im CarbO<sub>2</sub>Bot®

Die Leitfähigkeit wird über einen Zeitraum von 100 Tagen bei einer konstanten Temperatur von  $20 \pm 1$  °C stündlich kumulativ erfasst. Aus der Änderung der Leitfähigkeit wird dann unter Berücksichtigung einer Korrektur durch mitgeführte Leerdosen mit folgender Formel die CO<sub>2</sub>-Freisetzung berechnet:

$$CO_2[mg] = \left(1 - \frac{\text{Leitfähigkeit Bodendose}}{\text{Leitfähigkeit Leerdose}}\right) * CO_2\text{Koeff.} * \text{Molarität Lauge}[mol] * \text{Volumen Lauge}[ml]$$

Der CO<sub>2</sub>-Koeffizient wird dabei nach Chapman (1971) mit 39,76 berechnet.

### Testsubstrate und Aufwandmengen

Der Versuch wurde mit der ersten, dritten und vierten Lieferungen der Gärprodukte der Kategorie 1, also insgesamt drei Mal, durchgeführt. Beim ersten Versuch wurden die Gärprodukte in Anlehnung an den Feldversuch entsprechend einer Stickstoffmenge von 200 kg ha<sup>-1</sup> N eingesetzt.

Für die Umrechnung der Produktmenge je Hektar auf die anzuwendende Produktmenge pro Gefäß wurde von folgenden Annahmen ausgegangen: Lagerungsdichte des Bodens =  $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ , Einarbeitungstiefe auf landwirtschaftlichen Flächen = 5 cm, Bodenmenge je Gefäß = 40 g.

Die ersten Versuchsergebnisse und die Analysen der von den Projektpartnern entwickelten Produkte machten im ersten Versuchsjahr deutlich, dass ohne die Beimengung zusätzlicher Nährstoffquellen ein wirtschaftlich interessanter Düngeeffekt kaum erzielt werden könnte. Die Versuche wurden dementsprechend im zweiten Jahr umgestellt und die zu testende Menge jeweils an der Trockenmasse und nicht mehr am Stickstoffgehalt ausgerichtet. Für die Bodenatmungsversuche bedeutete dies, dass für den zweiten und dritten Versuch Gärprodukte entsprechend einer Menge von  $10 \text{ t ha}^{-1} \text{ TM}$  eingesetzt wurden, was der hohen Aufwandmenge im Feldversuch entspricht. Die Annahmen für die Umrechnung blieben unverändert.

In allen Versuchen wurden jeweils Gefäße ohne Gärprodukt, d.h. nur mit Testboden (= Kontrolle) mitgeführt. Unter Abzug der Kontrolle kann auch die prozentuale Abbaurate des eingewogenen Kohlenstoffs berechnet werden. Dazu wurden jeweils zusätzlich Gefäße mit Glucose eingesetzt, die bei der Betrachtung der prozentualen C-Abbaurate als Vergleich herangezogen wurden. Die Menge an Glucose betrug im ersten Versuch 0,4 g FM und ab dem zweiten Versuch 0,2 g FM je Gefäß, wobei die Menge im ersten Versuch an den im Mittel durch die Gärprodukte zugeführten Mengen an Kohlenstoff ausgerichtet war und ab dem zweiten Versuch an Standardwerten, da in der gleichen Anlage auch andere Produkte getestet wurden.

Die eingewogenen Mengen an Kohlenstoff sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Eingewogene Menge an Kohlenstoff (mg je Gefäß) in den drei Bodenatmungsversuchen

| Versuch Nr.<br>(GP-Lieferung) | Feinfraktion | Agglomerate | Pellets | Grobfraktion | Glukose |
|-------------------------------|--------------|-------------|---------|--------------|---------|
| 1 (Juni 2014)                 | 127,4        | 137,7       | 152,6   | 175,8        | 156,0   |
| 2 (Juni 2015)                 | 149,7        | 154,3       | 148,6   | 156,7        | 80,0    |
| 3 (Oktober 2015)              | 111,9        | 123,2       | 103,1   | 130,8        | 76,1    |

## Boden

Für die Versuche wurden verschiedene Böden verwendet. Der Boden, welcher für den ersten Test verwendet wurde, war eine 50:50-Mischung von Boden jeweils aus der Krume einer unbehandelten Kontrollfläche der Lehr- und Forschungsstation Thyrow der Humboldt-Universität zu Berlin und der Versuchsstation des Instituts für Agrar- und Stadtökologische Projekte (IASP) in Berge. Für den zweiten und dritten Versuch wurde ausschließlich Boden aus Berge verwendet, der vom Vorgewende der Fläche stammte, auf der auch der Feldversuch durchgeführt wurde. Textur und chemische Eigenschaften der beiden Böden sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Textur und chemischer Status des Bodens an den Standorten Thyrow und Berge

| Standort | Sand (%) | Schluff (%) | Ton (%) | C <sub>org</sub> (% TM) | pH  |
|----------|----------|-------------|---------|-------------------------|-----|
| Thyrow   | 83,1     | 14,2        | 2,7     | < 0,9                   | 5,8 |
| Berge    | 75,6     | 16,6        | 7,8     | < 1,7                   | 6,6 |

Die Wasserhaltekapazität  $WHK_{max}$  betrug in den drei Versuchen 36, 26 und 28 Vol-%. Die Bodenfeuchtigkeit wurde auf 70 % der Wasserhaltekapazität eingestellt.

### Statistik

Alle Varianten wurden je nach Verfügbarkeit an Plätzen in der Anlage drei- bis vierfach wiederholt. Die Ergebnisse sind dargestellt als Mittelwerte aus den Wiederholungen. Die Ergebnisse des prozentualen Kohlenstoffabbaus nach 100 Tagen wurden mit Hilfe von SPSS Statistics Desktop 20.0 für Windows auf signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen untersucht. Angewendet wurde eine einfaktorielle ANOVA, gefolgt vom Tukey's HSD Test ( $P \leq 0.05$ ).

### 3.1.3 Ergebnisse und Diskussion

Wie Abbildung 5 und Tabelle 9 zu entnehmen, verlief die  $CO_2$ -Freisetzung und damit auch die Kohlenstoffmineralisierung in den drei Bodenatmungsversuchen durchaus unterschiedlich. Dies ist auf eine Kombination aus Boden- und Produkteigenschaften zurückzuführen. Durch die Grobfraction wurde mit 4,8, 6,3 bzw. 2,9 mg  $CO_2$  je g Boden stets mehr  $CO_2$  freigesetzt als durch die anderen Gärprodukte. Allerdings war die Menge an Kohlenstoff, die pro Gefäß eingewogen wurde, auch bei der Grobfraction in allen drei Versuchen am höchsten (Tabelle 7). Betrachtet man die prozentuale Mineralisierung des eingewogenen Kohlenstoffs, so war diese bei der Grobfraction im zweiten Versuch tendenziell und im dritten Versuch auch statistisch signifikant höher als bei den anderen Produkten (Tabelle 9). Ursache hierfür sind eventuell Bestandteile in der Grobfraction, die zwar großflächig sind bzw. ein großes Volumen besitzen, aber nicht verdichtet oder stabilisiert und deshalb trotzdem leicht abbaubar sind. Dies könnten z.B. Papierstücke oder Pflanzenbestandteile sein, die nach Sieben in der Feinfraction nicht mehr enthalten sind, weshalb diese zum Teil geringere Mineralisierungsraten aufweist als die Grobfraction. Die im Vergleich zu den anderen Varianten erhöhte  $CO_2$ -Freisetzung je Gramm Boden ist somit bei der Grobfraction auf eine Kombination aus höheren Mengen an zugeführtem Kohlenstoff je Gefäß und höheren Kohlenstoffumsetzungsraten zurückzuführen.

Tabelle 9: Kohlenstoffmineralisierungsrate (% des eingewogenen C) der Gärprodukte und von Glucose in den drei Bodenatmungsversuchen nach 100 Tagen. Verschiedene Buchstaben innerhalb einer Zeile markieren signifikante Unterschiede zwischen den Testsubstraten (Tukey's HSD-Test,  $P \leq 0,05$ ).

| Versuch Nr.<br>(GP-Lieferung) | Feinfraction            | Agglomerate              | Pellets                 | Grobfraction             | Glukose                  |
|-------------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1 (Juni 2014)                 | 29,5 ± 8,1 <sup>b</sup> | 22,4 ± 2,6 <sup>ab</sup> | 19,4 ± 4,4 <sup>a</sup> | 23,3 ± 6,5 <sup>ab</sup> | 99,5 ± 0,7 <sup>c</sup>  |
| 3 (Juni 2015)                 | 24,7 ± 5,9 <sup>a</sup> | 22,3 ± 6,6 <sup>a</sup>  | 25,8 ± 5,4 <sup>a</sup> | 31,7 ± 8,9 <sup>a</sup>  | 96,4 ± 2,3 <sup>b</sup>  |
| 4 (Oktober 2015)              | 4,4 ± 0,8 <sup>a</sup>  | 6,9 ± 0,6 <sup>ab</sup>  | 9,7 ± 1,9 <sup>bc</sup> | 11,2 ± 2,2 <sup>c</sup>  | 100,0 ± 1,6 <sup>d</sup> |

Während es zwischen den Agglomeraten und den Pellets in allen drei Versuchen sowohl bei der  $CO_2$ -Freisetzung als auch bei der C-Mineralisierungsrate kaum messbare Unterschiede gab, schwankten die Ergebnisse der Feinfraction im Verhältnis zu den anderen Produkten stark. Im ersten Versuch war die  $CO_2$ -Freisetzung aus den Gefäßen mit Feinfraction von Beginn der Messungen an höher als aus denen mit Agglomeraten und Pellets. Im zweiten Versuch war die  $CO_2$ -Abgabe aus diesen drei Varianten etwa gleich groß, während im dritten Versuch die Feinfraction

von allen Gärprodukten zu den geringsten Bodenatmungsraten führte. Die Gärprodukte der ersten Lieferung wiesen hohe TS- (> 74 %) und oTS-Gehalte (> 50 %) auf. Die Aufbereitung und Formgebung war bei den Agglomeraten und Pellets in dieser Lieferung planmäßig verlaufen, d.h. die Produkte waren dicht und formstabil mit glatten Oberflächen. Gleichzeitig war der R-Index bei den Agglomeraten und Pellets vergleichsweise hoch (vergleiche Tabelle 3), was auf die Anwesenheit von wasserabweisenden organischen Verbindungen hinweist (Hallett, 2008; Hallett *et al.*, 2003). Dadurch wurden vermutlich die Wasseraufnahme und damit der Zerfall und Abbau der Produkte im Vergleich zu Fein- und Grobfraktion verlangsamt. Dies spiegelt sich auch in der Kohlenstoffmineralisierungsrate wieder, die im ersten Versuch bei Agglomeraten und Pellets geringer war als bei den aus losen Partikeln bestehenden Produkten Fein- und Grobfraktion. Auffällig bleibt jedoch die geringe CO<sub>2</sub>-Freisetzung und C-Mineralisierungsrate der Feinfraktion im dritten Versuch, da zwischen den Produkten in Bezug auf Nährelementgehalte und sonstige chemische Eigenschaften keine wesentlichen Unterschiede festgestellt wurden und auch Schwermetall- und Störstoffgehalte der Feinfraktion nicht höher waren als in den Agglomeraten und Pellets. Unter sonst gleichen Bedingungen wären aufgrund der größeren Oberfläche aus der Feinfraktion eine höhere CO<sub>2</sub>-Freisetzung und eine schnellere Kohlenstoffmineralisierung zu erwarten als aus den Agglomeraten und den Pellets. Als Ursache für die langsamere Umsetzung der Kohlenstoffverbindungen kommen z.B. organische Schadstoffe in Frage, die bei den Untersuchungen der Gärprodukte nicht erfasst wurden. Diese Schadstoffe würden aus der Feinfraktion eventuell eher freigesetzt als aus den weiter verarbeiteten Produkten. Somit wäre die mikrobielle Aktivität durch die Zugabe der organischen Substanz zwar angeregt und gegenüber dem reinen Kontrollboden gesteigert, im Vergleich zu den Agglomeraten oder Pellets aber durch frei werdende Schadstoffe beschränkt worden. Dies bleibt jedoch aufgrund fehlender Analysen bezüglich anderer Schadstoffgruppen spekulativ. Wahrscheinlicher ist, dass es während der Lagerung der Produkte nach Abschluss von Aufbereitung und Analysen in der Feinfraktion zu einem weiteren Abbau organischer Verbindungen gekommen ist, was in den Agglomeraten und Pellets durch Verdichtung des Materials und Glättung der Oberflächen verhindert wurde.

Beim zweiten Versuch wurden mit 4,9 bis 6,4 mg CO<sub>2</sub> je g Boden bei allen Gärprodukten die höchsten CO<sub>2</sub>-Mengen freigesetzt (Abbildung 5). Dies ist vor allem der Tatsache geschuldet, dass die Kompostierungsdauer der Gärprodukte dieser Lieferung vergleichsweise kurz war (< 6 Wochen, Tietze (2015)) und die Kompostierung damit vermutlich nicht zu einer vollständigen Stabilisierung der organischen Substanz geführt hat, wodurch den Mikroorganismen eine höhere Menge an leicht abbaubaren Kohlenstoffverbindungen zur Verfügung stand. Hinzu kommt, dass für den zweiten Versuch ausschließlich Boden aus Berge verwendet wurde, der höhere Gehalte an organischer Substanz aufweist. Unter sonst gleichen Bedingungen besteht in der Regel eine enge Beziehung zwischen dem Humusgehalt und der biologischen Aktivität, da die organische Substanz die Lebensgrundlage der heterotrophen Bodenorganismen darstellt (Blume *et al.*, 2010). Möglicherweise wurde durch den Boden aus Berge eine größere Menge an Bodenorganismen bereitgestellt bzw. diesen eine bessere Ausgangssituation geboten, weshalb die CO<sub>2</sub>-Freisetzung und die Kohlenstoffabbauraten im zweiten Versuch höher ausgefallen sind als im ersten Versuch.

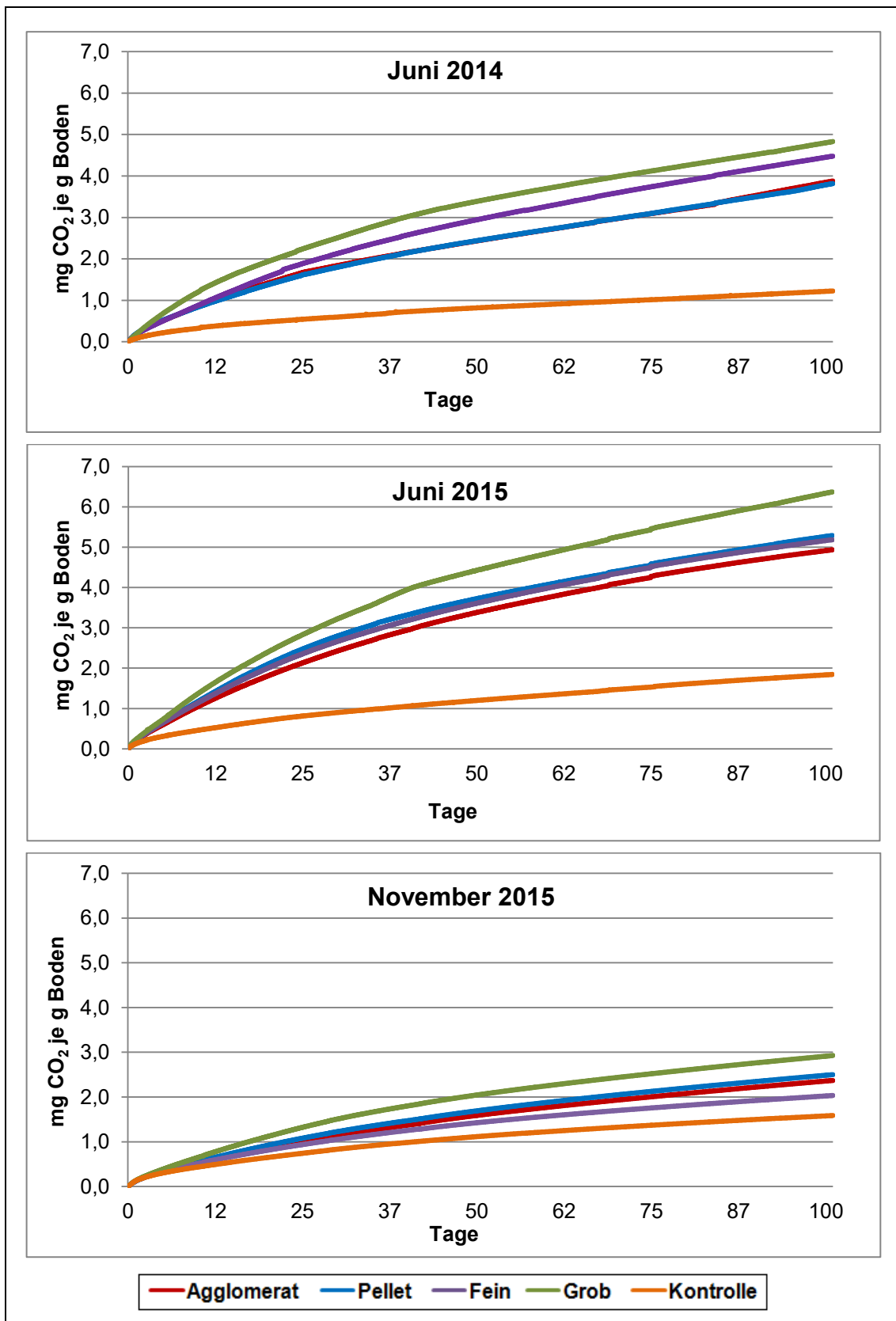


Abbildung 5: Kumulierte CO<sub>2</sub>-Freisetzung je Gramm Boden in den drei Bodenatmungsversuchen

Im dritten Versuch war bei Verwendung des gleichen Bodens die Bodenatmung in den Gefäßen mit Gärprodukten nur etwa halb so groß wie im zweiten Versuch, während die Respiration in den Kontrollgefäßen nahezu unverändert war. Auch die C-Mineralisierungsrate war im dritten Versuch

bei den Gärprodukten wesentlich geringer als in den ersten beiden Versuchen, während die Abbaurate beim Standard Glucose nach 100 Tagen auch hier 100 % betrug. Eine Beeinträchtigung der Mikroorganismenpopulation, die sich in einem Absinken der Bodenatmungsrate auf ein Niveau unterhalb des reinen Kontrollbodens ausgedrückt hätte, wurde in diesem Versuch ebenso wenig beobachtet wie in den ersten beiden Versuchen. Der kompostierte Gärrest, der für die Lieferung vom Oktober 2015 verwendet wurde, war vor der Weiterbearbeitung länger und unter trockeneren Witterungsbedingungen gelagert worden als jener aus der Lieferung vom Juni 2015, die für den zweiten Versuch verwendet wurde (Tietze, 2015). Dies zeigte sich nicht nur in den höheren TS-Gehalten ( $> 53\%$  im Oktober gegenüber  $< 39\%$  im Juni), sondern auch in einer besseren Formstabilität der Agglomerate und Pellets. Die niedrigen Bodenatmungsergebnisse sind beim dritten Versuch also in erster Linie auf eine nach Vergärung und Kompostierung nahezu abgeschlossene Stabilisierung der organischen Substanz zurückzuführen.

Üblicherweise besteht eine positive Korrelation zwischen dem Gehalt an leicht abbaubarem Kohlenstoff und der Mineralisierungsrate (Bermejo Domínguez, 2012). Über die drei hier beschriebenen Versuche hinweg konnte dieser Zusammenhang bestätigt werden. Von Bedeutung waren zudem die Gehalte an Ammonium- und Gesamtstickstoff. Zwischen der Kohlenstoffmineralisierungsrate einerseits und den Gehalten an  $C_{org}$ , Ammonium-N und  $N_{ges}$  andererseits wurden positive Korrelationen von  $r = 0,82$ ,  $r = 0,79$  und  $r = 0,77$  gefunden.

Kompost zeichnet sich unter anderem durch seine Eigenschaften als Humusquelle und das damit verbundene Kohlenstoffbindungspotential aus. Laut EPEA (2004) ist bei Fertigkomposten von einem Gehalt an stabilen Humuskomponenten von bis zu 50 % auszugehen, sowie von einem deutschlandweiten Kohlenstoffbindungspotential von bis zu 0,62 Mio. t durch Einsatz von Komposten in der Landwirtschaft. Kompost kann damit, abgesehen von seiner Funktion als Nährstofflieferant, auf zwei Wegen die Bodeneigenschaften und damit die Bodenfruchtbarkeit erhalten und fördern: Durch Zufuhr stabiler organischer Substanz, die dem Aufbau von Dauerhumus dient, und durch Zufuhr von leichter mineralisierbarem Nährhumus, der der Ernährung der mikrobiellen Gemeinschaft im Boden dient und deren Aktivität fördert (Scherer *et al.*, 2008). Die Mineralisierungsraten und die Verläufe der  $CO_2$ -Kurven lassen darauf schließen, dass die hier untersuchten Gärprodukte beide oben genannten Humusfraktionen bereitstellen: Den leicht abbaubaren Nährhumus, welcher die Aktivität der Bodenorganismen fördert, und den stabilen Dauerhumus, der eine langfristige Anhebung der Gehalte an organischer Substanz ermöglicht. In den ersten 100 Tagen wurden im Mittel der drei Versuche zwischen 17,2 und 19,5 % des in den jeweiligen Gärprodukten enthaltenen Kohlenstoffs mineralisiert. Krieger *et al.* (2013) gaben in ähnlichen Bodenatmungsversuchen nach 100 Tagen für verschiedene flüssige Gärreste aus der Mono- und Kofermentation von Maissilage Kohlenstoffmineralisierungsraten zwischen 25 und 30 % an. Durch die zusätzliche Kompostierung und Aufbereitung der Bioabfallgärreste im hier vorgestellten Projekt wurde die organische Substanz weiter stabilisiert und das Mineralisierungspotential herabgesetzt. Die untersuchten Produkte enthielten im Mittel zwischen 24,7 - 27,6 %  $C_{org}$ . Nimmt man die in den Versuchen ermittelten Mineralisierungsraten als Berechnungsgrundlage, so ist davon auszugehen, dass durch kompostierte Gärprodukte aus Bioabfällen je Tonne Trockenmasse zwischen

199 und 215 kg stabilisierter Kohlenstoff in den Boden eingebracht werden. Bei einer maximal erlaubten Menge von 30 t TM in drei Jahren (BioAbfV, 2013) entspricht dies sechs bis sechseinhalf  $t\ ha^{-1}$  Kohlenstoff, die nicht schnell umgesetzt, sondern im Boden in organischer Substanz sequestriert werden können.

### 3.1.4 Schlussfolgerungen

Zusammenfassend lassen sich aus den Bodenatmungsversuchen folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Eine toxische Wirkung der Gärprodukte auf die Mikroorganismenpopulationen wurde nicht festgestellt.
- Agglomerat- bzw. Pelletbildung kann die Abbaubarkeit der Gärprodukte verringern. Zwischen Agglomeraten und Pellets gibt es trotz der in Kapitel 1.2.2. beschriebenen verschiedenen Eigenschaften kaum messbare Unterschiede hinsichtlich der Abbaugeschwindigkeit.
- Siebung kann leicht abbaubare Bestandteile des Komposts entfernen und dadurch die Mineralisierung des verbleibenden Materials verringern.
- Die Kompostierungsdauer und der TS-Gehalt beeinflussen die Kohlenstoffmineralisierung und die  $CO_2$ -Freisetzung erheblich, zumal auch das Gelingen der Agglomerat- bzw. Pelletbildung von diesen Faktoren beeinflusst wird. Je vollständiger die Kompostierung abläuft, desto stabiler sind die Gärprodukte anschließend im Boden. Die für das Abbauverhalten im Boden entscheidenden Produkteigenschaften sind die Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte in der Reihenfolge  $C_{org} > Ammonium-N > N_{ges}$ , die mit  $r = 0,82$ ,  $r = 0,79$  und  $r = 0,77$  positiv mit der Mineralisierungsrate des Kohlenstoffs korreliert sind.
- Durchschnittlich 20 bis maximal 30 % des in den Gärprodukten enthaltenen Kohlenstoffs werden bei entsprechenden Witterungsbedingungen in den ersten 100 Tagen mineralisiert, wodurch die Aktivität der Bodenorganismen gefördert wird.
- Im Mittel verbleiben 80 % des in den Gärprodukten enthaltenen Kohlenstoffs als stabile organische Substanz im Boden und können damit zum Erhalt der Bodenfruchtbarkeit beitragen bzw. als Kohlenstoffsенke fungieren.



### 3.2 Wirkungen der Gärprodukte auf Regenwürmer in Labor und Freiland

*Die Inhalte dieses Kapitels wurden zum Teil bereits veröffentlicht in Ross et al. (2017b): "Assessing the Impact of Soil Amendments made of processed Biowaste Digestate on Soil Macrofauna using two different Earthworm Species" im Journal "Archives of Agronomy and Soil Science".*

Wie bereits an anderer Stelle beschrieben, können Bioabfälle Schadstoffe wie Schwermetalle, Pathogene oder giftige Chemikalien und organische Verbindungen enthalten (Veeken und Hamelers, 2002; Weber et al., 2007; Achiba et al., 2009; Déportes et al., 1995; Böhnelt und Lube, 2000). Die Konzentration eines Schadstoffes allein reicht in der Regel nicht aus, um die von ihm ausgehende Gefahr für die Umwelt einzuschätzen, weil die Wirkung von vielen anderen Faktoren beeinflusst wird (Tuominen et al., 2002). Ökologische Tests werden benötigt, um vom theoretischen auf das reale Gefahrenpotential schließen zu können (Kapanen und Itävaara, 2001; Alvarenga et al., 2007). Vermeidungstests mit Regenwürmern gelten als geeignete Methode zur schnellen Bestimmung des Gefährdungspotentials von Böden, die mit organischen Schadstoffen, Schwermetallen, Bioziden oder pharmazeutischen Rückständen kontaminiert wurden (Booth et al., 2005; Lukkari et al., 2005). Regenwürmer ernähren sich von der organischen Substanz im Boden und nehmen so Nähr- und Schadstoffe daraus auf. Außerdem stehen sie dauernd in unmittelbarem Kontakt mit der Bodenlösung und den darin gelösten Stoffen (LUBW, 2006). Dies und die Tatsache, dass die gesamte Haut als Atmungsorgan dient, machen Regenwürmer zu ausgezeichneten Bioindikatoren, wenn es um mögliche toxische Bodenbedingungen geht (Fründ et al., 2010). Die Vorteile von Vermeidungstests sind ihre kurze Laufzeit und ihre Sensitivität, die toxische Effekte auch bei subletalen Konzentrationen sichtbar macht (Schaefer, 2003). Die ISO-Richtlinie ISO 17512-1 (2008) empfiehlt die Verwendung von *Eisenia fetida* als Testorganismus, weil diese Regenwurmart einfach zu züchten und unter Laborbedingungen zu halten ist. *E. fetida* ist deswegen vermutlich die in ökotoxikologischen Tests am meisten genutzte Art überhaupt (Maleri et al., 2008). Bei *E. fetida* handelt es sich jedoch um eine epigäische Regenwurmart, die unter natürlichen Bedingungen vor allem in Komposthaufen und anderen Ansammlungen von organischem Material zu finden ist (Monroy et al., 2006; Klobucar et al., 2011), und von der bekannt ist, dass ihre Resistenz und Sensitivität gegenüber bestimmten Schadstoffen von denen anderer Regenwurmartarten abweichen kann (Stenersen et al., 1992; Fourie et al., 2007; Lukkari et al., 2005; Owojori und Reinecke, 2009). Dies ist vor allem auf artspezifische Unterschiede im Fraß- und Grabverhalten zurückzuführen, die zu unterschiedlichen Expositionen und Schadstoffaufnahmen führen (Morgan und Morgan, 1999). Ergebnisse, die mit *E. fetida* gewonnen wurden, sind unter Umständen nicht auf andere Bodenorganismen in landwirtschaftlich genutzten Böden übertragbar (Spurgeon et al., 2004; Loureiro et al., 2005; De Silva und van Gestel, 2009). Wadhia und Thompson (2007) empfehlen deshalb ebenso wie Jarratt und Thompson (2009), dass im Rahmen von ökotoxikologischen Tests eine oder mehrere Spezies als Testorganismus verwendet werden, die natürlicherweise dort vorkommen, wo die Testsubstanz eingesetzt bzw. aufgefunden wird.

### 3.2.1 Zielstellung

Im Rahmen dieser Arbeit sollten die aufbereiteten Gärprodukte auf eine mögliche Toxizität für Bodenorganismen überprüft werden. Zu diesem Zweck wurden mit jeder Lieferung Vermeidungstests mit *Eisenia fetida* durchgeführt. Zusätzlich wurde mit der Lieferung vom Oktober 2014 ein Vermeidungstest mit *Aporrectodea caliginosa* durchgeführt, einer endogäischen Regenwurmart, die in horizontalen Gängen in der organisch-mineralischen Bodenmatrix lebt und in europäischen Ackerböden weit verbreitet ist (Morgan und Morgan, 1999; Klobucar *et al.*, 2011; Roubíčková und Frouz, 2014). *A. caliginosa* ist weniger stark auf das Vorhandensein großer Mengen an leicht abbaubarer organischer Substanz angewiesen als *E. fetida*, und reagiert darauf je nach Art und Zusammensetzung des Materials positiv oder mit Vermeidung (Irmeler, 2007; Pérès *et al.*, 2011). Ergebnisse, die mit *A. caliginosa* ermittelt wurden, sollten deshalb besser auf eine landwirtschaftliche Anwendung der Produkte übertragbar sein.

Das Testergebnis kann auch durch das Entwicklungsstadium der Regenwürmer beeinflusst werden. Booth und O'Halloran (2001) fanden z.B., dass juvenile Tiere der Art *A. caliginosa* wesentlich empfindlicher auf Pestizidexposition reagieren als adulte Tiere und Spurgeon und Hopkin (1996) beobachteten den gleichen Effekt für *E. fetida* bei Versuchen mit Schwermetallen. Xie *et al.* (2013) berichteten, dass polybromierte Diphenyl-Ether für juvenile Exemplare von *E. fetida* toxisch wirkten, während adulte Tiere durch die gleichen Substanzen nicht beeinträchtigt wurden. Die ISO-Norm empfiehlt aus diesem Grund die ausschließliche Verwendung adulter Würmer. Bei großen Testserien ist es jedoch oft nicht möglich, eine ausreichende Anzahl adulter Würmer der gleichen Herkunft bereitzustellen. Auch in den dieser Arbeit zugrunde liegenden Versuchen war dies nur in einem von fünf Fällen möglich. Um einen Eindruck von möglichen Unterschieden zwischen der Reaktion adulter und juveniler Tiere zu bekommen wurden deshalb bei den vergleichenden Versuchen mit *E. fetida* und *A. caliginosa* (Gärprodukte vom Oktober 2014) beide Entwicklungsstadien getrennt ausgewertet.

Neben den Vermeidungstests wurden auch einmalig im Jahr 2015 Regenwürmer im Feldversuch gezählt und bestimmt. Regenwürmer reagieren sehr sensitiv auf sich verändernde Umweltfaktoren. So können z.B. Bewirtschaftungsmaßnahmen wie Düngung und Bodenbearbeitung starken Einfluss auf Abundanz, Biomasse und Artenspektrum nehmen (Wragge, 2014). Die Zufuhr von organischer Substanz ist dabei einer der wichtigsten Faktoren, welche die Abundanz von Regenwürmern positiv beeinflussen (Edwards und Bohlen, 1996; Edwards und Lofty, 1982; KiyasudeenS *et al.*, 2016; Johnston *et al.*, 2015). Der Einsatz von Kompost auf landwirtschaftlich genutzten Flächen führt deshalb häufig zu einer Vergrößerung der Regenwurmpopulationen und / oder zu einer gesteigerten Regenwurmaktivität (Leroy *et al.*, 2007; Carpenter-Boggs *et al.*, 2000; Zaller und Köpke, 2004), wobei sich verschiedene Arten in unterschiedlichen Bodenschichten ansiedeln und organische Substanz und Nährstoffe im gesamten Wurzelraum verteilen (Fechner und Kehres, 2014). Im Feldversuch wurde mehrfach beobachtet, dass die ausgebrachten Gärprodukte von den Regenwürmern eingearbeitet und als Nahrungsquelle genutzt werden, was sich u.a. an der dunkel gefärbten Losung an der Oberfläche zeigt (Abbildung 6)



Abbildung 6: Durch Gärprodukt-Aufnahme dunkel gefärbte Regenwurmlosung in einer Parzelle mit Feinfraktion (oben) bzw. Pellets (unten) im Herbst 2015

Auch in den Vermeidungstests befanden sich die Regenwürmer häufig an bzw. in den Gärprodukten (Abbildung 7).

Fermentierte und anschließend kompostierte Biomasse ist durch die verschiedenen mikrobiellen Abbauprozesse allerdings weitgehend stabilisiert und enthält nur geringe Mengen an leicht abbaubaren Kohlenstoffverbindungen und schnell verfügbaren Nährstoffen (Leroy *et al.*, 2008).





Abbildung 7: Gärprodukt in pelletierter Form mit Regenwurm (*Eisenia fetida*) nach Versuchsende [Foto: Roß]

Die Wirkung von kompostierten Gärresten ist deshalb geringer als die von unfermentierten oder besonders frischen Komposten. Geophage Regenwurmartens wie *A. caliginosa*, die eher auf labile C-Verbindungen als Nahrungsquelle angewiesen sind und damit in Konkurrenz zum mikrobiellen Abbau stehen, profitieren von (kompostierten) Gärresten noch weniger als phytophage Arten wie z.B. *Lumbricus terrestris* oder *Aporrectodea longa* (Ernst *et al.*, 2008; Ernst *et al.*, 2009).

Da Agglomeration bzw. Pelletierung die unmittelbare Verfügbarkeit der organischen Biomasse und der enthaltenen Nährstoffe weiter herabsetzt, wurde im Feldversuch eine Staffelung der Regenwurmabundanz in der Reihenfolge *Feinfraktion* > *Agglomerate u. Pellets* > *Kontrolle* erwartet (die Grobfraction wurde nicht untersucht).

### 3.2.2 Vermeidungstests

#### 3.2.2.1 Material und Methoden

##### Versuchsdurchführung

Die Vermeidungstests wurden entsprechend der ISO Norm 17512-1 (2008) durchgeführt. Plastikcontainer (1 l Volumen) wurden in zwei Hälften geteilt. Auf einer Seite wurden sie mit einer Boden-Gärprodukt- bzw. Boden-Dünger-Mischung befüllt, auf der anderen Seite mit unbehandeltem Kontrollboden. Je Versuch wurden zehn Regenwürmer auf der Trennlinie zwischen den beiden Hälften eingesetzt (Abbildung 8). Beim Versuch mit *A. caliginosa* wurde die Anzahl der Regenwürmer auf acht reduziert, um der Größe dieser Art Rechnung zu tragen. Auf beiden Seiten wurde 1 g Luzernemehl hinzugefügt, um eine Entscheidung der Würmer aufgrund von Nahrungsmangel auf der Kontrollseite auszuschließen.

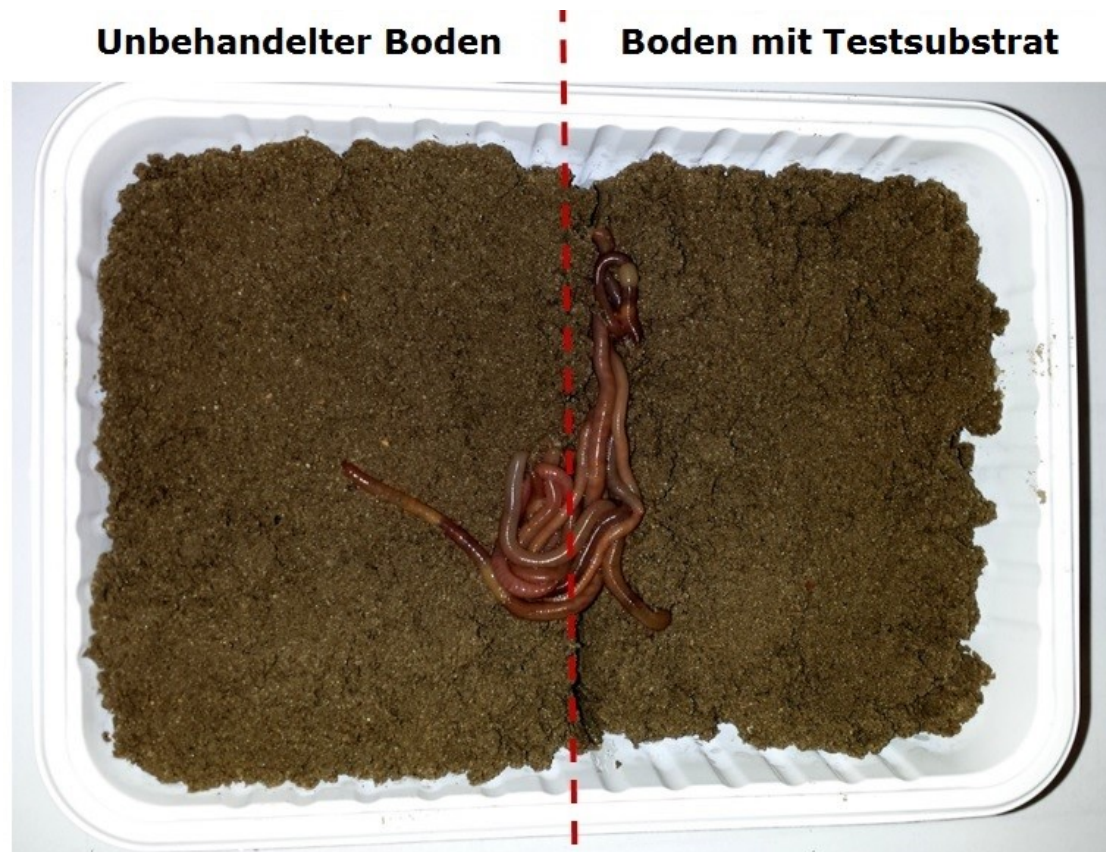


Abbildung 8: Ansatz des Regenwurmvermeidungstests. Testbehälter mit 10 frisch eingesetzten Regenwürmern (*Eisenia fetida*) [Foto: Roß]

Durch Wasserzugabe wurde eine Bodenfeuchte von 50 % der maximalen Wasserhaltekapazität eingestellt, wobei jeweils 25 % des Wassers in den Gärprodukten für die Berechnung der notwendigen Wassermenge angerechnet wurde. Die Gefäße wurden anschließend mit transparenten, perforierten Deckeln verschlossen und in einem Klimaschrank (Modell WB 2000 KHFL) der Firma mytron Bio- und Solartechnik GmbH (Heiligenstadt, Deutschland) aufgestellt, in dem ein Licht/Dunkel-Zyklus von 16/8 h eingestellt wurde. Die Temperatur betrug während der Versuche mit *E. fetida* gemäß der ISO Norm  $20 \pm 1$  °C. Für *A. caliginosa* wurde eine Temperatur von  $10 \pm 1$  °C gewählt. Dies entspricht den Empfehlungen von Edwards und Bohlen (1996) und Lee (1985), nach denen Temperaturen zwischen 10 und 15 °C von *A. caliginosa* am besten vertragen werden, wobei kühle und feuchte Bedingungen generell einer trockeneren oder wärmeren Umgebung vorgezogen werden.

Nach 48 Stunden wurde die Anzahl der Würmer auf beiden Seiten gezählt. Ausgehend von einer 50:50-Verteilung wurde mit folgender Formel die Vermeidung des zu testenden Substrates berechnet:

$$\text{Vermeidung} = \frac{\text{Würmer auf der Kontrollseite} - \text{Würmer auf der Testsubstratseite}}{\text{Gesamtanzahl Würmer}} * 100$$

Eine negative Vermeidung bedeutet dabei, dass die Substratseite gegenüber der Kontrollseite bevorzugt wurde.

Bei den Versuchen mit beiden Arten im Oktober 2014 sowie beim Versuch im Jahr 2016 (Gärprodukte mit Zuschlagstoffen) wurde zusätzlich die Gewichtsveränderung der Würmer erfasst und ausgewertet. Von jeder Seite der Container wurden nach Versuchsende Bodenproben entnommen und auf den pH-Wert und den Wassergehalt untersucht.

#### Gärprodukte, Dünger und Aufwandmengen

Die Versuche wurden mit allen Lieferungen der Gärprodukte der Kategorien 1 und 2 durchgeführt. Zum Vergleich wurden jeweils eine Variante mit KAS und eine Variante mit Rinderstallmist („SM“) angelegt, deren Trockensubstanz- und Stickstoffgehalte und pH-Werte in Tabelle 10 dargestellt sind.

Tabelle 10: Trockensubstanz- und Stickstoffgehalte und pH-Werte von Kalkammonsalpeter (KAS) und Stallmist in den Regenwurmvermeidungstests

| Dünger                              | TS    | oTS  | N <sub>ges.</sub>     | NH <sub>4</sub> -N | pH  |
|-------------------------------------|-------|------|-----------------------|--------------------|-----|
|                                     | (%)   |      | g kg <sup>-1</sup> TM |                    |     |
| KAS                                 | 100,0 | -    | 270,0                 | 135,0              |     |
| Stallmist                           |       |      |                       |                    |     |
| Versuch Juni 2014                   | 27,1  | 78,2 | 26,0                  | 3,0                | 8,5 |
| Versuch Oktober 2014                | 19,3  | 61,7 | 24,3                  | 2,1                | 9,0 |
| Versuch Juni 2015                   | 21,9  | 69,4 | 29,0                  | 2,0                | 7,6 |
| Versuch Oktober 2015                | 26,3  | 59,8 | 24,5                  | 2,0                | 7,8 |
| Versuch GP mit Zuschlagstoffen 2016 | 24,3  | n.b. | 20,3                  | 3,0                | 8,9 |

Zum Einsatz kamen in 2014 und 2016 Aufwandmengen entsprechend 200 und 400 kg ha<sup>-1</sup> N. Im Jahr 2015 wurden aufgrund der schon an anderer Stelle beschriebenen Überlegungen zur Stickstoffthematik die Gärprodukte und der Stallmist auf Basis des Trockensubstanzgehalte eingewogen. Angewendet wurden deshalb im Juni und Oktober 2015 Aufwandmengen entsprechend 5 und 10 t ha<sup>-1</sup> Trockenmasse. KAS wurde in allen Versuchen aufgrund der zu erwartenden hohen Vermeidung dieses Düngemittels als Negativ-Kontrolle mitgeführt und diente vor allem der Überprüfung eines normalen Vermeidungsverhaltens der Tiere. Die Aufwandmenge für KAS blieb deshalb in allen Versuchen konstant entsprechend 200 und 400 kg ha<sup>-1</sup> N. Da aufgrund der unterschiedlichen Stickstoffgehalte eine Vergleichbarkeit mit den Gärprodukten im Jahr 2015 nicht gegeben war, wurden die KAS-Varianten in diesem Jahr nicht in die statistische Auswertung einbezogen.

Alle geprüften Faktorkombinationen wurden vierfach wiederholt. Die Berechnung der Produktmenge je Container erfolgte mit den gleichen Annahmen wie bei den phytotoxikologischen Versuchen. Aus logistischen Gründen konnte nicht immer mit allen Produktvarianten bzw. Aufwandmengen getestet werden. Die jeweils untersuchten Varianten sind in Tabelle 11 aufgeführt.

#### Herkunft und Handhabung der Würmer

Die Regenwürmer der Art *Eisenia fetida* wurden einer im Labor des IASP vorhandenen Zucht entnommen. Individuen der Art *A. caliginosa* wurden auf einer Versuchsfläche im Freiland im Boden einer unbehandelten Kontrollparzelle gesammelt.

Tabelle 11: Geprüfte Faktorkombinationen in den Vermeidungstests mit Regenwürmern. Mit „X“ markierte Kombinationen wurden getestet.

| Prüffaktor A: Düngeprodukt                                       | Prüffaktor B: Aufwandmenge  |  |
|--|---|--|
| <b>Test 1: Gärproduktlieferung Juni 2014</b>                     | b1= 200 kg ha <sup>-1</sup> N   | b2 = 400 kg ha <sup>-1</sup> N   |
| a1 = Feinfraktion  | X   | X  |
| a2 = Agglomerate   | X   | X  |
| a3 = Pellets   | X   | X  |
| a4 = Grobfraktion  | X   | X  |
| a5 = Kalkammonsalpeter   | X   | X  |
| a6 = Stallmist   | X   | X  |
| <b>Test 2: Gärproduktlieferung Oktober 2014</b>                  | b1= 200 kg ha <sup>-1</sup> N   | b2 = 400 kg ha <sup>-1</sup> N   |
| a1 = Feinfraktion  | X   | X  |
| a2 = Agglomerate   | X   | X  |
| a3 = Pellets   | X   | X  |
| a4 = Grobfraktion  |   |  |
| a5 = Kalkammonsalpeter   | X   | X  |
| a6 = Stallmist   | X   | X  |
| <b>Test 3 und 4: Gärproduktlieferungen Juni und Oktober 2015</b> | b1 = 5 t ha <sup>-1</sup> TM<br>bzw.<br>200 kg ha <sup>-1</sup> N (KAS) | b2 = 10 t ha <sup>-1</sup> TM<br>bzw.<br>400 kg ha <sup>-1</sup> N (KAS) |
| a1 = Feinfraktion  | X   | X  |
| a2 = Agglomerate   | X   | X  |
| a3 = Pellets   | X   | X  |
| a4 = Grobfraktion  | X   | X  |
| a5 = Kalkammonsalpeter   | X   | X  |
| a6 = Stallmist   | X   | X  |
| <b>Test 5: Gärprodukte der Kategorie 2 (2016)</b>                | b1= 200 kg ha <sup>-1</sup> N   | b2 = 400 kg ha <sup>-1</sup> N   |
| a1 = AggloGr   |   | X  |
| a2 = AggloGr+TM  | X   | X  |
| a3 = AggloGr+TM+Ton  |   | X  |
| a4 = AggloGr+TM+Stroh  |   | X  |
| a5 = AggloGr+KAS   | X   | X  |
| a6 = AggloGr+KAS+Ton   |   | X  |
| a7 = AggloGr+KAS+Stroh   |   | X  |
| a8 = Kalkammonsalpeter   | X   | X  |
| a9 = Stallmist   |   | X  |

Die Regenwürmer wurden in die Entwicklungsstadien juvenil und adult unterteilt und, bei Betrachtung des Gewichts, vor und nach dem Versuch individuell gewogen. Das Wiegen erfolgte ohne vorherige Entleerung des Darms, da dies zu einer Schwächung der Würmer führen kann (Fründ *et al.*, 2010) und weil ohne Darmentleerung die Veränderung des Gesamtgewichts als Indikator für die Aktivität und Futteraufnahme der Würmer genutzt werden kann (Dittbrenner *et al.*, 2010).

Wie bereits dargestellt, konnten nicht in allen Versuchen ausreichend adulte Tiere bereitgestellt werden. Anzahl und Entwicklungsstadien der Regenwürmer bei den einzelnen Versuchen sind Tabelle 12 zu entnehmen.

### Boden

Der für den Test verwendete Boden entstammte dem Vorgewende der Fläche, auf der auch der Feldversuch durchgeführt wurde. Textur und chemische Eigenschaften sind bereits in Kapitel 3.1.2 (Tabelle 8) dargestellt.

Tabelle 12: Anzahl und Entwicklungsstadien der Regenwürmer in den einzelnen Versuchen

| Gärprodukt-Charge und Regenwurmart   | Anzahl juvenile Tiere | Anzahl adulte Tiere |
|--|-----------------------|---------------------|
| <b>Gärprodukte ohne Zuschlagstoffe</b>   |                       |                     |
| <b>Juni 2014</b><br><i>Eisenia fetida</i>                                      | 7                     | 3                   |
| <b>Oktober 2014</b><br><i>Eisenia fetida</i><br><i>Aporrectodea caliginosa</i> | 4<br>3                | 6<br>5              |
| <b>Juni 2015</b><br><i>Eisenia fetida</i>                                      | 10                    | 0                   |
| <b>Oktober 2015</b><br><i>Eisenia fetida</i>                                   | 6                     | 4                   |
| <b>Gärprodukte mit Zuschlagstoffen (2016)</b>                                  |                       |                     |
| <i>Eisenia fetida</i>  | 0                     | 10                  |

### Statistische Analyse

Die Ergebnisse wurden mit Hilfe von SPSS Statistics Desktop 20.0 für Windows auf signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen hin untersucht. Angewendet wurde dafür eine einfaktorielle ANOVA, gefolgt vom Tukey's HSD Test ( $P \leq 0.05$ ). Zur Untersuchung von Haupt- und Wechselwirkungen wurde zusätzlich eine univariate, zweifaktorielle ANOVA mit den Faktoren Düngeprodukt und Aufwandmenge angewendet. Die Ergebnisse sind dargestellt als Mittelwerte aus den Wiederholungen  $\pm$  Standardabweichung.

### 3.2.2.2 Ergebnisse und Diskussion

*Vermeidungstest Oktober 2014: Vergleich zwischen Eisenia fetida und Aporrectodea caliginosa*

#### pH-Wert und Feuchtigkeitsgehalt des Bodens

Zu Versuchsende wurden Bodenproben zur Bestimmung des pH-Wertes und der Bodenfeuchtigkeit genommen. Der Trockensubstanzgehalt des Bodens rangierte zwischen 90 (hohe Aufwandmenge Pellets) und 84 % (hohe Aufwandmenge Stallmist) und wurde vor allem durch Art und Aufbereitungsform des zu testenden Substrates beeinflusst. 25 % des Wassers im jeweiligen Produkt wurden beim Versuchsansatz angerechnet und die Wasserzugabe zum Boden entsprechend angepasst. Das Wasser war jedoch vermutlich in den aufbereiteten Gärprodukten vergleichsweise fest eingeschlossen, während beim Stallmist ein Austausch mit dem umgebenden Boden möglich war, was zu den geringfügigen Unterschieden bei der Bodenfeuchtigkeit am Ende des Versuches führte.

Der pH-Wert wurde im Test mit *E. fetida* durch den Einsatz aller Testsubstrate mit Ausnahme der Pellets erhöht und war in den mit Stallmist behandelten Varianten am höchsten, gefolgt von den hohen Aufwandmengen an Feinfraktion, Agglomeraten und KAS (Tabelle 13). Im Test mit *A. caliginosa* war der pH-Wert grundsätzlich niedriger als im Test mit *E. fetida*. Die Unterschiede waren in den mit Stallmist behandelten Varianten am größten. Die Gesamttendenz war jedoch insofern gleich, als die jeweils höhere Aufwandmenge bei jedem Substrat zu höheren pH-Werten führte.



Tabelle 13: pH-Werte des Bodens im Vermeidungstest Oktober 2014 mit *E. fetida* und *A. caliginosa*. Daten dargestellt als Mittelwerte.

| Düngeprodukt  | Aufwandmenge (kg ha <sup>-1</sup> N) | <i>E. fetida</i> | <i>A. caliginosa</i> |
|---------------|--------------------------------------|------------------|----------------------|
| Kontrollseite | 0                                    | 6,0              | 5,8                  |
| Feinfraktion  | 200                                  | 6,5              | 5,8                  |
| Pellets       |                                      | 6,0              | 5,7                  |
| Agglomerate   |                                      | 6,4              | 5,8                  |
| Stallmist     |                                      | 7,1              | 6,1                  |
| KAS           |                                      | 6,5              | 5,8                  |
| Feinfraktion  | 400                                  | 6,8              | 6,1                  |
| Pellets       |                                      | 6,1              | 5,7                  |
| Agglomerate   |                                      | 6,8              | 5,9                  |
| Stallmist     |                                      | 7,2              | 6,7                  |
| KAS           |                                      | 6,9              | 6,1                  |

Insbesondere die Anwendung von Gärprodukten und Stallmist führt häufig zu einer Erhöhung des pH-Wertes im Boden (Wragge, 2014; Ernst *et al.*, 2008; Walker *et al.*, 2004; Whalen *et al.*, 2000). Die Gegenwart und Aktivität von Regenwürmern kann aber durch Abgabe von Calciumverbindungen ebenfalls zu einem Anstieg des pH-Wertes führen (Lee, 1985; Cheng und Wong, 2002; Robertson, 1936). Wie groß diese Beeinflussung ist hängt von den physiologischen Eigenschaften der jeweiligen Spezies ab, was die pH-Unterschiede zwischen den beiden Tests erklären könnte (Wen *et al.*, 2004).

Mit pH-Werten zwischen 6,0 und 7,2 bei *E. fetida* und 5,7 und 6,7 bei *A. caliginosa* befanden sich alle Varianten innerhalb eines für die jeweilige Art gut verträglichen Bereichs (Edwards und Bohlen, 1996; Graefe *et al.*, 2002; Hou *et al.*, 2005). Es ist daher nicht davon auszugehen, dass das Vermeidungsverhalten der Regenwürmer durch den pH-Wert des Bodens beeinflusst wurde.

### Vermeidung

Das Vermeidungsverhalten der beiden Arten gegenüber den getesteten Produkten unterschied sich bei allen Gärprodukten und beim Stallmist signifikant voneinander (Tabelle 14). Kalkammonsalpeter wurde dagegen von beiden Arten gleichermaßen gemieden. Dies ist vermutlich vor allem auf die hohen Gehalte an Ammoniumnitrat zurückzuführen. Salze wie Ammoniumnitrat können in hohen Konzentrationen Reizungen hervorrufen und auf Regenwürmer toxisch wirken (Diaz-Lopez und Mancha, 1994). Im Freiland kann die Düngung mit ammoniumhaltigen Produkten bzw. mit Produkten, die größere Mengen Ammoniak freisetzen, bei hohen Aufwandsmengen Regenwürmer schädigen oder diese zur Flucht an die Oberfläche treiben, an der die Tiere dann aufgrund der UV-Strahlung verenden (Curry, 1976; Edwards und Loft, 1982). Langfristig können hohe Salzgehalte die Abundanz der Regenwürmer reduzieren bzw. zu einer veränderten Zusammensetzung des Artenspektrums führen (Scullion und Ramshaw, 1987; Gudleifsson, 2002; Curry, 1976).

Bei den meisten Behandlungen unterschieden sich die beiden Arten nur hinsichtlich der Intensität der Vermeidungsreaktion, wenn auch, wie bei der Feinfraktion in der niedrigen Aufwandsmenge, um fast 80 %. In den meisten Fällen war die Reaktion von *A. caliginosa*

Tabelle 14: Vermeidung und Gewichtsveränderung bei adulten und juvenilen Tieren der Arten *E. fetida* und *A. caliginosa* und Einfluss der Haupt- und Wechselwirkungen der einzelnen Faktoren. Daten sind dargestellt als Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer Spalte (Tukey's HSD Test,  $p \leq 0,05$ ). Kursiv und fett gedruckte Werte unterschieden sich signifikant von ihrem benachbarten Gegenstück, d.h. z.B. adulte von juvenilen Tieren. Signifikante Haupt- und Interaktionseffekte ( $p \leq 0,05$ ) sind zur besseren Übersichtlichkeit fett gedruckt.

| Düngerprodukt               | Aufwandmenge<br>(kg ha <sup>-1</sup> N) | Vermeidung ges. (%)       |                         | Vermeidung <i>E. fetida</i> (%)       |                         | Vermeidung <i>A. caliginosa</i> (%)       |                         |
|-----------------------------|---|---------------------------|-------------------------|---------------------------------------|-------------------------|---|-------------------------|
|                             |   | <i>E. fetida</i>          | <i>A. caliginosa</i>    | adulte                                | juvenile                | adulte                                    | juvenile                |
| Feinfraktion                | 200                                     | - 85 ± 19 <sup>a</sup>    | - 6 ± 24 <sup>a</sup>   | - 83 ± 19 <sup>a</sup>                | - 88 ± 25 <sup>a</sup>  | ± 0 ± 23 <sup>a</sup>                     | - 17 ± 64 <sup>ab</sup> |
| Pellets                     |   | - 65 ± 19 <sup>a</sup>    | - 19 ± 13 <sup>a</sup>  | - 50 ± 19 <sup>a</sup>                | - 88 ± 25 <sup>a</sup>  | ± 0 ± 23 <sup>a</sup>                     | - 50 ± 33 <sup>a</sup>  |
| Agglomerate                 |   | - 55 ± 19 <sup>a</sup>    | - 6 ± 24 <sup>a</sup>   | - 50 ± 43 <sup>a</sup>                | - 63 ± 48 <sup>ab</sup> | ± 0 ± 23 <sup>a</sup>                     | - 17 ± 64 <sup>ab</sup> |
| Stallmist                   |   | - 55 ± 19 <sup>a</sup>    | + 94 ± 13 <sup>b</sup>  | - 67 ± 27 <sup>a</sup>                | - 38 ± 25 <sup>ab</sup> | + 90 ± 20 <sup>b</sup>                    | + 100 ± 0 <sup>b</sup>  |
| KAS                         |   | + 75 ± 25 <sup>b</sup>    | + 100 ± 0 <sup>b</sup>  | + 83 ± 19 <sup>b</sup>                | + 63 ± 48 <sup>b</sup>  | + 100 ± 0 <sup>b</sup>                    | + 100 ± 0 <sup>b</sup>  |
| Feinfraktion                | 400                                     | - 90 ± 12 <sup>a</sup>    | + 45 ± 47 <sup>ab</sup> | - 92 ± 17 <sup>a</sup>                | - 88 ± 25 <sup>a</sup>  | + 40 ± 40 <sup>ab</sup>                   | + 50 ± 64 <sup>ab</sup> |
| Pellets                     |   | - 80 ± 16 <sup>a</sup>    | - 19 ± 43 <sup>ab</sup> | - 75 ± 17 <sup>a</sup>                | - 88 ± 25 <sup>a</sup>  | - 20 ± 33 <sup>a</sup>                    | - 17 ± 64 <sup>ab</sup> |
| Agglomerate                 |   | - 100 ± 0 <sup>a</sup>    | ± 0 ± 35 <sup>ab</sup>  | - 100 ± 0 <sup>a</sup>                | - 100 ± 0 <sup>a</sup>  | ± 0 ± 40 <sup>ab</sup>                    | ± 0 ± 38 <sup>ab</sup>  |
| Stallmist                   |   | - 80 ± 16 <sup>a</sup>    | + 100 ± 0 <sup>b</sup>  | - 75 ± 32 <sup>a</sup>                | - 88 ± 25 <sup>a</sup>  | + 100 ± 0 <sup>b</sup>                    | + 100 ± 0 <sup>b</sup>  |
| KAS                         |   | + 83 ± 29 <sup>b</sup>    | + 100 ± 0 <sup>b</sup>  | + 92 ± 17 <sup>b</sup>                | + 69 ± 47 <sup>b</sup>  | + 100 ± 0 <sup>b</sup>                    | + 100 ± 0 <sup>b</sup>  |
| Haupt- und Wechselwirkungen |   |                           |                         |                                       |                         |   |                         |
| Düngerprodukt (Faktor A)    |   | < 0,001                   | < 0,001                 | < 0,001                               | < 0,001                 | < 0,001                                   | < 0,001                 |
| Aufwandmenge (Faktor B)     |   | 0,010                     | 0,139                   | 0,033                                 | 0,125                   | 0,454                                     | 0,100                   |
| Interaktion A x B           |   | 0,091                     | 0,283                   | 0,165                                 | 0,315                   | 0,218                                     | 0,521                   |
|                             |   |                           |                         |                                       |                         |   |                         |
| Düngerprodukt               | Aufwandmenge<br>(kg ha <sup>-1</sup> N) | Gewichtsänderung ges. (%) |                         | Gewichtsänderung <i>E. fetida</i> (%) |                         | Gewichtsänderung <i>A. caliginosa</i> (%) |                         |
|                             |   | <i>E. fetida</i>          | <i>A. caliginosa</i>    | adulte                                | juvenile                | adulte                                    | juvenile                |
| Feinfraktion                | 200                                     | + 17 ± 6 <sup>a</sup>     | + 4 ± 5 <sup>a</sup>    | + 15 ± 8 <sup>a</sup>                 | + 22 ± 8 <sup>a</sup>   | + 5 ± 8 <sup>a</sup>                      | + 1 ± 2 <sup>a</sup>    |
| Pellets                     |   | + 10 ± 7 <sup>a</sup>     | ± 0 ± 5 <sup>a</sup>    | + 7 ± 9 <sup>a</sup>                  | + 21 ± 11 <sup>a</sup>  | ± 0 ± 4 <sup>a</sup>                      | + 1 ± 8 <sup>a</sup>    |
| Agglomerate                 |   | + 17 ± 3 <sup>a</sup>     | + 5 ± 3 <sup>a</sup>    | + 15 ± 4 <sup>a</sup>                 | + 25 ± 4 <sup>a</sup>   | + 6 ± 4 <sup>a</sup>                      | + 2 ± 3 <sup>a</sup>    |
| Stallmist                   |   | + 17 ± 6 <sup>a</sup>     | + 2 ± 1 <sup>a</sup>    | + 13 ± 4 <sup>a</sup>                 | + 25 ± 10 <sup>a</sup>  | + 4 ± 5 <sup>a</sup>                      | - 1 ± 10 <sup>a</sup>   |
| KAS                         |   | + 14 ± 13 <sup>a</sup>    | - 1 ± 6 <sup>a</sup>    | + 7 ± 18 <sup>a</sup>                 | + 33 ± 5 <sup>a</sup>   | - 1 ± 6 <sup>a</sup>                      | + 1 ± 7 <sup>a</sup>    |
| Feinfraktion                | 400                                     | + 19 ± 2 <sup>a</sup>     | - 5 ± 15 <sup>a</sup>   | + 17 ± 2 <sup>a</sup>                 | + 26 ± 6 <sup>a</sup>   | - 6 ± 18 <sup>a</sup>                     | ± 0 ± 10 <sup>a</sup>   |
| Pellets                     |   | + 14 ± 2 <sup>a</sup>     | + 4 ± 3 <sup>a</sup>    | + 12 ± 4 <sup>a</sup>                 | + 23 ± 6 <sup>a</sup>   | + 5 ± 4 <sup>a</sup>                      | ± 0 ± 5 <sup>a</sup>    |
| Agglomerate                 |   | + 16 ± 6 <sup>a</sup>     | + 3 ± 5 <sup>a</sup>    | + 16 ± 7 <sup>a</sup>                 | + 17 ± 7 <sup>a</sup>   | + 5 ± 5 <sup>a</sup>                      | ± 0 ± 6 <sup>a</sup>    |
| Stallmist                   |   | + 18 ± 9 <sup>a</sup>     | - 2 ± 3 <sup>a</sup>    | + 16 ± 10 <sup>a</sup>                | + 24 ± 8 <sup>a</sup>   | - 3 ± 2 <sup>a</sup>                      | + 2 ± 9 <sup>a</sup>    |
| KAS                         |   | + 22 ± 18 <sup>a</sup>    | + 2 ± 5 <sup>a</sup>    | + 24 ± 25 <sup>a</sup>                | + 22 ± 19 <sup>a</sup>  | + 1 ± 5 <sup>a</sup>                      | + 4 ± 8 <sup>a</sup>    |
| Haupt- und Wechselwirkungen |   |                           |                         |                                       |                         |   |                         |
| Düngerprodukt (Faktor A)    |   | 0,651                     | 0,699                   | 0,767                                 | 0,674                   | 0,477                                     | 0,987                   |
| Aufwandmenge (Faktor B)     |   | 0,246                     | 0,411                   | 0,128                                 | 0,299                   | 0,332                                     | 0,865                   |
| Interaktion A x B           |   | 0,840                     | 0,273                   | 0,668                                 | 0,482                   | 0,175                                     | 0,938                   |

weniger deutlich ausgeprägt als die von *E. fetida*, d.h. die positive bzw. negative prozentuale Vermeidung war geringer. Dies passt zu Studien, die ebenfalls Hinweise darauf fanden, dass *A. caliginosa* weniger sensitiv auf organische und mineralische Dünger oder Salzstress reagiert als andere Regenwurmart (Owojori *et al.*, 2009; Edwards und Lofty, 1982).

Bei einigen Varianten war das Vermeidungsverhalten der beiden Regenwurmart exakt gegensätzlich, was zu vollständig unterschiedlichen Testergebnissen führte. Bei *E. fetida* wurde eine deutlich negative Vermeidung, d.h. eine Bevorzugung der Substratseite in allen Varianten beobachtet, denen organische Substanz zugefügt worden war. Die Bevorzugung der Substratseite war in allen Varianten in der höheren Aufwandmenge größer als in der niedrigen Aufwandmenge. Dies entspricht der bekannten Vorliebe dieser Regenwurmart für Ansammlungen organischer Substanz (Edwards und Bohlen, 1996) und deutet auf die Abwesenheit von schädlichen Substanzen hin (Hund-Rinke und Wiechering, 2001). Zwischen den verschiedenen Aufbereitungsformen der Gärprodukte wurden keine signifikanten Unterschiede beobachtet. Im Gegensatz zu *E. fetida* vermied *A. caliginosa* die mit Stallmist behandelten Varianten fast ebenso deutlich wie die mit KAS behandelten Varianten (positive Vermeidung von über 90 %) und bevorzugte bei Anwendung der höheren Aufwandmenge auch in den Gefäßen mit Feinfraktion die Kontrollseite gegenüber der Substratseite. Trotz der im Mittel positiven Vermeidung der Feinfraktion in der hohen Aufwandmenge unterschied sich das Vermeidungsverhalten aufgrund der hohen Standardabweichung nicht signifikant vom Verhalten der Regenwürmer gegenüber den anderen Gärprodukten, unabhängig von der Aufwandmenge. Eine größere Zahl an Wiederholungen wäre notwendig, um zu überprüfen, ob es sich um eine echte Vermeidung der Feinfraktion handelt, oder eher um ein Zufallsergebnis, welches durch das insgesamt indifferente Verhalten von *A. caliginosa* gegenüber den Gärprodukten zustande gekommen ist.

Die Vermeidung des Stallmists durch *A. caliginosa* betrug demgegenüber vor allem in der hohen Aufwandmenge in allen vier Wiederholungen 100 % und war damit sehr deutlich. Dies überrascht, da in vielen Feldversuchen die Abundanz und Biomasse von Regenwürmern in mit Stallmist gedüngten Parzellen deutlich größer ist als in Parzellen mit mineralischer oder ohne Düngung. In der Regel dienen organische Dünger wie Stallmist als Nahrungsquelle und führen zu insgesamt verbesserten Lebensbedingungen für Regenwürmer (Edwards und Lofty, 1982; Curry *et al.*, 2008; Whalen *et al.*, 1998). Es ist allerdings bekannt, dass die Ausbringung frischer Gülle Regenwurmpopulationen kurzfristig schädigen kann aufgrund von hohen Gehalten an Ammonium, Benzoesäure oder Natriumsulfat (Curry, 1976; Edwards und Lofty, 1982). Dies könnte auch auf frischen Stallmist zutreffen, zumal die Ammoniumgehalte im Stallmist mit  $2,1 \text{ g kg}^{-1} \text{ TM}$  um 50 bis 70 % höher waren als in den Gärprodukten und vermutlich aus diesem auch deutlich schneller freigesetzt wurden als aus den aufbereiteten Gärprodukten. Aufgrund der oben beschriebenen niedrigeren Sensibilität von *A. caliginosa* gegenüber Salzstress oder Düngemitteln wäre trotzdem keine Beeinträchtigung dieser Art durch Stallmist zu erwarten gewesen. Hansen und Pommeresche (2005) haben in einem Feldversuch allerdings ebenfalls negative Effekte nach der Ausbringung von Stallmist beobachtet, und zwar ebenso nur für endogäische und nicht für epigäische Arten. Sie vermuteten, dass dies auch durch einen Mangel an Nahrung und nicht nur

durch toxische Effekte zu erklären sei, da sich endogäische Arten, im Gegensatz zu epigäischen Regenwürmern, hauptsächlich von mineralischen und Humuspartikeln im Boden ernähren und weniger von Pflanzenresten und anderer frischer organischer Substanz an der Oberfläche (Hansen und Pommeresche, 2005; Neilson und Boag, 2003). Hinzu kommt, dass *A. caliginosa* kleinteilige bzw. gemahlene Nahrungspartikel ( $< 0,2$  mm Länge) bevorzugt (Boström und Lofsholmin, 1986; Neilson und Boag, 2003). Im hier beschriebenen Versuch nutzte *E. fetida* wahrscheinlich die Gärprodukte und den Stallmist als Nahrungsquelle, während *A. caliginosa* stattdessen eher das auf beiden Seiten zugefügte Luzernemehl bevorzugte. Dies führte zu einem uneindeutigen Vermeidungsverhalten von *A. caliginosa* gegenüber den Gärprodukten und zu einer Meidung des ammoniumreicheren Stallmists.

In Bezug auf die Entwicklungsstadien konnten signifikante Unterschiede nur in einem Fall bei *A. caliginosa* beobachtet werden, in dem juvenile Würmer die mit Pellets behandelte Substratseite stärker bevorzugten als adulte Würmer der gleichen Art. Für *E. fetida* konnte in keinem Fall ein signifikanter Unterschied im Vermeidungsverhalten von juvenilen und adulten Würmern beobachtet werden.

#### Gewichtsveränderung

Das Gewicht der Regenwürmer wurde jeweils vor und nach dem 48-stündigen Versuch erfasst. Für *E. fetida* wurde in allen Varianten eine mittlere Zunahme zwischen 10 und 25 % verzeichnet (Tabelle 14), während bei *A. caliginosa* in den meisten Varianten eine Zunahme von nur 5 % oder weniger beobachtet wurde. In den mit KAS (niedrige Aufwandmenge) bzw. Feinfraktion und Stallmist (hohe Aufwandmenge) behandelten Varianten wurde im Mittel sogar eine Gewichtsreduktion festgestellt. Dies unterstützt die Vermutung, dass das Vermeidungsverhalten von *A. caliginosa* zumindest zum Teil durch einen Mangel an geeigneter Nahrung beeinflusst wurde, während *E. fetida* von der Applikation der Gärprodukte und des Stallmists profitierte.

*E. fetida* zeigte zudem signifikante Unterschiede zwischen den Entwicklungsstadien in Bezug auf die Gewichtsänderung in drei Fällen (KAS und Agglomerate in niedriger und Pellets in hoher Aufwandmenge), wobei die juvenilen Tiere relativ mehr an Gewicht zunahmen als adulte Tiere. Diese Ergebnisse passen zu den Studien von Bouwman und Reinecke (1991), die adulte Exemplare von *E. fetida* als unfähig beschrieben, sich einem künstlichen Kulturmedium anzupassen, während sich juvenile Tiere schnell adaptierten und entsprechende Zuwachsraten zeigten. Marhan und Scheu (2005) beobachteten in Versuchen mit mineralischen Düngemitteln ebenfalls bei juvenilen Tieren der Art *Octolasion tyrtaeum* größere Zunahmen als bei adulten Tieren. Sie begründeten dies mit der fehlenden Qualität der zur Verfügung stehenden Nahrung. Dies liegt daran, dass eine zunehmende Körpermasse es schwieriger macht, dem wachsenden Körpergewebe genügend Ressourcen zuzuführen, da das Gewebe mit einem Exponenten von drei, die Oberfläche des assimilatorischen Epithels im Verdauungstrakt aber nur mit einem Exponenten von zwei ansteigt. Größere Tiere sind somit nicht nur auf mehr, sondern auch auf qualitativ hochwertigere Nahrung angewiesen als kleinere Tiere. Fründ *et al.* (2010) ergänzten, dass juvenile Würmer in ihrer Fraß- und Wachstumsaktivität insgesamt konsistenter sind, während adulte Tiere

durch ihr komplexeres Verhalten Energie auch anderweitig als nur zur Biomassebildung verbrauchen.

Für *A. caliginosa* wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen adulten und juvenilen Tieren hinsichtlich der Gewichtsveränderung beobachtet.

#### Weitere Vermeidungstests mit *Eisenia fetida* (Juni 2014, Juni und Oktober 2015)

Die Verteilung der Würmer auf Substrat- und Kontrollseite in den einzelnen Versuchen ist in Abbildung A 1 bis Abbildung A 5 dargestellt. Die daraus errechnete prozentuale Vermeidung ist Tabelle 15 zu entnehmen. Die Vorliebe von *E. fetida* für organische Substanz bestätigte sich auch in den anderen drei Vermeidungstests. Sowohl der Stallmist als auch die Gärprodukte wurden in fast allen Fällen gegenüber dem Kontrollboden bevorzugt.

Tabelle 15: Vermeidung (%) durch *Eisenia fetida* in den Versuchen mit Gärprodukten der Kategorie 1 und Einfluss der Haupt- und Wechselwirkungen der einzelnen Faktoren. Daten sind dargestellt als Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer Spalte (Tukey's HSD Test,  $p \leq 0,05$ ). Signifikante Haupt- und Interaktionseffekte sind zur besseren Übersichtlichkeit fett gedruckt. Kursive Daten wurden nicht in die statistische Auswertung einbezogen.

| Dünge-pro-<br>dukt   | Aufwandmenge  | Vermeidung (%)             |                            |                            |
|--|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
|  |   | Juni 2014                  | Juni 2015                  | Okt. 2015                  |
| Feinfraktion   | 200 kg ha <sup>-1</sup> N (Juni 2014)<br>oder<br>5 t ha <sup>-1</sup> TM (Juni u. Oktober 2015) | - 75 $\pm$ 19 <sup>a</sup> | - 55 $\pm$ 10 <sup>a</sup> | - 25 $\pm$ 41 <sup>a</sup> |
| Agglomerat   |   | - 95 $\pm$ 10 <sup>a</sup> | - 45 $\pm$ 41 <sup>a</sup> | - 20 $\pm$ 28 <sup>a</sup> |
| Pellet   |   | - 75 $\pm$ 30 <sup>a</sup> | - 50 $\pm$ 35 <sup>a</sup> | - 10 $\pm$ 35 <sup>a</sup> |
| Grobfraktion   |   | - 80 $\pm$ 28 <sup>a</sup> | - 25 $\pm$ 53 <sup>a</sup> | - 15 $\pm$ 30 <sup>a</sup> |
| Stallmist  |   | - 85 $\pm$ 19 <sup>a</sup> | - 60 $\pm$ 23 <sup>a</sup> | - 68 $\pm$ 38 <sup>a</sup> |
| KAS  | 200 kg ha <sup>-1</sup> N   | + 55 $\pm$ 34 <sup>b</sup> | - 15 $\pm$ 34              | + 60 $\pm$ 16              |
| Feinfraktion   | 400 kg ha <sup>-1</sup> N<br>oder<br>10 t ha <sup>-1</sup> TM (Juni u. Oktober 2015)            | - 90 $\pm$ 12 <sup>a</sup> | - 35 $\pm$ 44 <sup>a</sup> | - 25 $\pm$ 44 <sup>a</sup> |
| Agglomerat   |   | - 100 $\pm$ 0 <sup>a</sup> | - 50 $\pm$ 20 <sup>a</sup> | - 15 $\pm$ 50 <sup>a</sup> |
| Pellet   |   | - 85 $\pm$ 10 <sup>a</sup> | - 70 $\pm$ 12 <sup>a</sup> | - 30 $\pm$ 47 <sup>a</sup> |
| Grobfraktion   |   | - 75 $\pm$ 30 <sup>a</sup> | - 90 $\pm$ 12 <sup>a</sup> | + 5 $\pm$ 38 <sup>a</sup>  |
| Stallmist  |   | - 75 $\pm$ 19 <sup>a</sup> | - 50 $\pm$ 12 <sup>a</sup> | - 60 $\pm$ 16 <sup>a</sup> |
| KAS  | 400 kg ha <sup>-1</sup> N   | + 85 $\pm$ 10 <sup>b</sup> | + 45 $\pm$ 41              | + 90 $\pm$ 20              |
| <b>Haupt- und Wechselwirkungen</b><br>(Juni und Oktober 2015 ohne KAS) |   |                            |                            |                            |
| Düngeprodukt (Faktor A)  |   | <b>&lt; 0,001</b>          | 0,828                      | <b>0,047</b>               |
| Aufwandmenge (Faktor B)  |   | 0,683                      | 0,217                      | 0,836                      |
| Interaktion A x B  |   | 0,324                      | 0,068                      | 0,879                      |

Eine Meidung der Gärprodukte, d.h. eine positive prozentuale Vermeidung, wurde nur ein einziges Mal beobachtet, und zwar im Versuch mit der Lieferung der Gärprodukte von Oktober 2015 bei der Grobfraktion in der hohen Aufwandmenge. Mit durchschnittlich 5,2 Würmern auf der Kontrollseite lag jedoch auch diese Variante unterhalb der Schwelle, die auf eine Einschränkung der Habitatfunktion des Bodens bzw. Testsubstrats hinweist. Diese ist erreicht, wenn 80 % der Würmer, in diesem Fall also 8 von 10 Tieren, bei Versuchsende auf der Kontrollseite zu finden sind (ISO 17512-1 (2008)). In den hier präsentierten Versuchen wurde dies nur bei den KAS-Varianten beobachtet, und zwar im Juni 2014 bei der hohen Aufwandmenge sowie im Oktober 2015 bei beiden Aufwandmengen. Zwischen den verschiedenen Aufbereitungsformen der Gärprodukte gab es keine signifikanten Unterschiede.

Auffällig ist, dass KAS im Juni 2015 in der niedrigen Aufwandmenge gegenüber dem Kontrollboden bevorzugt wurde. Die Vermeidung der hohen Aufwandmenge KAS fiel mit 45 % ebenfalls deutlich niedriger aus als in den anderen Tests. Über alle vier Versuche hinweg scheint es einen Zusammenhang zwischen dem Verhältnis juveniler zu adulten Tieren und dem Vermeidungsverhalten gegenüber KAS zu geben. Zwischen dem prozentualen Anteil juveniler Tiere an den Versuchstieren und der Vermeidung von KAS wurde eine deutliche negative Korrelation von  $r = -0,95$  (200 kg ha<sup>-1</sup> N) bzw.  $r = -0,83$  (400 kg ha<sup>-1</sup> N) festgestellt, d.h. je mehr juvenile Tiere im Test eingesetzt wurden, desto weniger stark wurde der mit KAS behandelte Boden gemieden. Dies widerspricht den oben beschriebenen Annahmen, dass juvenile Tiere gegenüber Stressfaktoren sensibler reagieren als adulte Tiere. Möglicherweise spielt aber auch das Fraßverhalten eine Rolle. Wenn, wie von Fründ *et al.* (2010) diskutiert, die Nahrungssuche bei juvenilen Tieren die hauptsächliche Triebfeder des Verhaltens darstellt, könnten diese Tiere auf der Suche nach verwertbarer organischer Substanz eher auch auf die weniger attraktive KAS-Seite des Behälters wechseln als adulte Tiere.

Der pH-Wert und der Feuchtigkeitsgehalt des Bodens spielten in den drei weiteren Vermeidungstests ebenso wie in den Versuchen vom Oktober 2014 keine Rolle. Mit 5,9 bzw. 6,0 war der pH-Wert zwar im Juni 2015 in den Varianten mit der niedrigen Aufwandmenge für *Eisenia fetida* eher niedrig (Tabelle A 1). Er lag damit aber immer noch im tolerablen Bereich (Edwards und Bohlen, 1996). Zudem gab es keinen Unterschied zur Kontrollseite, so dass eine Beeinflussung des Vermeidungsverhaltens ausgeschlossen werden kann. Auch in den anderen beiden Versuchen unterschieden sich die mit Gär- bzw. Düngeprodukten behandelten Böden nur geringfügig von der Kontrollseite, wobei durch Stallmist und KAS jeweils die höchsten pH-Werte eingestellt wurden. Die Bodenfeuchte schwankte in allen Versuchen zwischen den Varianten jeweils nur um ca. 2 % und war somit nicht für die Testentscheidung verantwortlich.

#### *Vermeidungstest 2016: Gärprodukte der Kategorie 2*

Im Vermeidungstest mit Gärprodukten der Kategorie 2 zeigten sich statistisch signifikante Unterschiede nur zwischen den Agglomeraten ohne Zuschlagstoffe (= AggloGr) und KAS. Die mit AggloGr behandelte Substratseite wurde gegenüber dem Kontrollboden bevorzugt, während die Anwendung von KAS zu der bereits in den anderen Versuchen beobachteten Ablehnung der Substratseite führte (Tabelle 16 und Abbildung A 6). In Bezug auf die anderen Gärprodukte wurden jedoch starke Tendenzen beobachtet, die aufgrund ihrer Bedeutung für zukünftige Entwicklungen in diesem Bereich trotz der fehlenden statistischen Signifikanz kurz diskutiert werden sollen. Agglomerate mit KAS wurden von den Regenwürmern in beiden Aufwandmengen gemieden. Die Zugabe von Ton zu den Agglomeraten beeinflusste die Ablehnung der Regenwürmer nicht, während die Zugabe von Stroh im Mittel zu einer Bevorzugung der Substratseite führte. Die Zugabe von organischer Substanz, insbesondere von Stroh und Cellulose, kann die Verfügbarkeit von Stickstoff reduzieren, weil anorganischer Stickstoff bei gleichzeitig ausreichend vorhandenem Kohlenstoff durch Mikroorganismen zu Biomasse umgesetzt und damit immobilisiert wird (Mengel, 1996; Powlson *et al.*, 1985; Scherer und Mengel, 1983; Mengel und Schmeer, 1985).

Aus dem KAS frei werdende Stickstoffverbindungen wurden möglicherweise durch das zugefügte Stroh bzw. durch Stroh abbauende Mikroorganismen gebunden und wirkten sich somit nicht auf das Vermeidungsverhalten der Regenwürmer aus.

Tabelle 16: Vermeidungsverhalten und Gewichtsveränderung von *Eisenia fetida* in den Versuchen mit Gärprodukten der Kategorie 2 und Einfluss der Haupt- und Wechselwirkungen der einzelnen Faktoren (nur für die in zwei Aufwandmengen getesteten drei Varianten AggloGr+TM, AggloGr+KAS und KAS). Daten sind dargestellt als Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer Spalte (Tukey's HSD Test,  $p \leq 0,05$ ). Signifikante Haupt- und Interaktionseffekte sind zur besseren Übersichtlichkeit fett gedruckt.

| Düngeprodukt                | Aufwandmenge<br>(kg ha <sup>-1</sup> N) | Vermeidung<br>(%)       | Gewichtsänderung<br>(%) |
|-----------------------------|---|-------------------------|-------------------------|
| AggloGr + TM                | 200                                     | - 5 ± 41 <sup>ab</sup>  | + 19 ± 4 <sup>a</sup>   |
| AggloGr + KAS               |   | + 30 ± 26 <sup>ab</sup> | + 15 ± 6 <sup>a</sup>   |
| KAS                         |   | + 15 ± 30 <sup>ab</sup> | + 21 ± 3 <sup>a</sup>   |
| AggloGr                     | 400                                     | - 19 ± 48 <sup>a</sup>  | + 7 ± 10 <sup>a</sup>   |
| AggloGr + TM                |   | + 20 ± 37 <sup>ab</sup> | + 17 ± 9 <sup>a</sup>   |
| AggloGr + TM + Ton          |   | + 35 ± 25 <sup>ab</sup> | + 18 ± 5 <sup>a</sup>   |
| AggloGr + TM + Stroh        |   | ± 0 ± 16 <sup>ab</sup>  | + 21 ± 11 <sup>a</sup>  |
| AggloGr + KAS               |   | + 8 ± 51 <sup>ab</sup>  | + 10 ± 6 <sup>a</sup>   |
| AggloGr + KAS + Ton         |   | + 50 ± 12 <sup>ab</sup> | + 19 ± 11 <sup>a</sup>  |
| AggloGr + KAS + Stroh       |   | - 15 ± 44 <sup>ab</sup> | + 15 ± 13 <sup>a</sup>  |
| Stallmist                   |   | - 10 ± 42 <sup>ab</sup> | + 23 ± 5 <sup>a</sup>   |
| KAS                         |   | + 70 ± 26 <sup>b</sup>  | + 19 ± 6 <sup>a</sup>   |
| Haupt- und Wechselwirkungen |   |                         |                         |
| Düngeprodukt (Faktor A)     |   | 0,172                   | <b>0,037</b>            |
| Aufwandmenge (Faktor B)     |   | 0,212                   | 0,209                   |
| Interaktion A x B           |   | 0,127                   | 0,880                   |

Die Agglomerate mit zusätzlichem Tiermehl wurden in der niedrigen Aufwandmenge gegenüber dem unbehandelten Kontrollboden leicht bevorzugt (negative Vermeidung von 5 %), bei einer Aufwandmenge entsprechend 400 kg ha<sup>-1</sup> N jedoch gemieden. Dies gilt auch für die Agglomerate, die zusätzlich zu Tiermehl Ton enthielten. Die Zugabe von Stroh führte demgegenüber zu einem neutralen Verhalten der Regenwürmer gegenüber den Tiermehl-Agglomeraten (Vermeidung  $\pm$  0). In Versuchen von Atuah und Hodson (2011) erwies sich Knochenmehl vor allem in den ersten Tagen nach der Anwendung als stark toxisch für Regenwürmer der Art *E. fetida*. Die Mortalität war doppelt so hoch wie bei den Vergleichsdüngern Triple Superphosphat und Kaliumhydrogenphosphat. Waschen und Veraschung vor der Ausbringung reduzierten die Toxizität deutlich, ebenso wie die zusätzliche Anwendung von Grünschnitt-Kompost. Die Autoren schlossen daraus, dass die Toxizität durch eine leicht lösliche Komponente in den organischen Bestandteilen bzw. Anhaftungen des Knochenmehls verursacht wird, die durch Verbrennung oder Waschen entfernt oder durch Bindung an organische Substanz eingefangen und unschädlich gemacht werden kann. Die hier beobachteten Effekte scheinen diese Theorie zu bestätigen.

Eine Beeinflussung des Vermeidungsverhaltens durch den pH-Wert oder die Bodenfeuchtigkeit (Tabelle A 2) konnte auch in diesem Versuch ausgeschlossen werden.

Die Regenwürmer nahmen in allen Varianten und allen Versuchsdurchläufen an Gewicht zu. Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten bzw. Aufwandmengen wurden nicht beobachtet. Offensichtlich konnten die Regenwürmer in allen Testbehältern vom beigemengten Luzernemehl

profitieren. Das Ziel, dass das Vermeidungsverhalten der Würmer nicht durch akuten Nahrungsmangel beeinflusst werden sollte, wurde somit erreicht.

### 3.2.3 Regenwurmarten und -abundanzen im Feldversuch

#### 3.2.3.1 Material und Methoden

Anlage und Varianten des Feldversuchs werden in Kapitel 3.6 beschrieben. Die Bestimmung und Zählung der Regenwürmer erfolgte vom 27. bis 29. April 2015 in jenen Parzellen, die ausschließlich mit Feinfraktion, Agglomeraten und Pellets gedüngt worden waren, sowie in der Kontrolle (Varianten FH, AH und PH, vergl. Tabelle 45). Bestimmt wurden Abundanz, Masse, Altersstufe (juvenil oder adult), Anzahl an Kokons sowie das Artenspektrum der Regenwurmpopulationen.

Je Parzelle wurde Boden auf einer Fläche von  $2 \times 1/8 \text{ m}^2$  bis zu einer Tiefe von 20 cm entnommen, so dass mit vier Wiederholungen insgesamt  $1 \text{ m}^2$  bzw.  $0,2 \text{ m}^3$  Boden je Variante untersucht wurde. Darauf folgte eine Handauslese der Proben, bei der Regenwürmer und Kokons gezählt wurden. Zur Erfassung anektischer Regenwurmarten erfolgte in den Ausgrabungsstellen eine Austreibung mit Allyl-Isothiocyanat in einer Verdünnung von  $100 \text{ mg l}^{-1}$  (Zaborski, 2003) (Abbildung 9). Während der Probennahmen wurden die Bodenfeuchte in 5 bis 15 cm Tiefe sowie die Temperatur im Oberboden (10 cm Tiefe) erfasst.



Abbildung 9: Entnahme von Boden (links) und Austrieb von tiefgrabenden Regenwurmarten mit Allyl-Isothiocyanat (rechts) im Feldversuch im Jahr 2015

#### 3.2.3.2 Ergebnisse und Diskussion

In Berge, einem Standort mit schwach bis mittel sandigen Lehm bzw. mittel lehmigen Sand und ca. 1 % organischer Bodensubstanz, wäre laut Krück *et al.* (2006) ein geringer bis hoher Regenwurmbesatz ( $10$  bis  $200 \text{ Tiere m}^{-2}$ ) und ein Auftreten der Arten *Aporrectodea caliginosa*, *Aporrectodea rosea*, *Allolobophora chlorotica* und *Lumbricus terrestris* zu erwarten. Tatsächlich wurden vor allem Exemplare der Arten *A. caliginosa* und *A. chlorotica* gefunden, sowie wenige Tiere der Art *Lumbricus terrestris*. Mit insgesamt 30 bis 46 Regenwürmern je Quadratmeter bewegte sich



die Gesamtanzahl in allen Parzellen im unteren Bereich des Erwartungswertes (Tabelle 17). Die mit Feinfraktion und Pellets gedüngten Parzellen wiesen mit durchschnittlich 46 bzw. 45 Tieren  $m^{-2}$  die höchsten Werte auf. Demgegenüber standen die Kontrolle und die mit Agglomeraten gedüngten Parzellen mit im Mittel jeweils 30 Tieren  $m^{-2}$ . Signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen konnten jedoch aufgrund der großen Schwankungen zwischen den Wiederholungen nicht festgestellt werden. Dies gilt auch für die Biomasse der erfassten Regenwürmer (Ergebnisse nicht dargestellt).

Tabelle 17: Anzahl an Regenwürmern und Kokons je Quadratmeter im Feldversuch im Jahr 2015. Daten dargestellt als Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer Zeile (Tukey's HSD Test,  $p \leq 0,05$ ).

| Art und Parameter        | Kontrolle                                | Feinfraktion                              | Agglomerate                               | Pellets                                   |
|--------------------------|--|---|---|---|
| <b>A. caliginosa</b>     |  |   |   |   |
| Anzahl adulte Tiere      | 4 $\pm$ 3 <sup>a</sup>                   | 5 $\pm$ 4 <sup>a</sup>                    | 9 $\pm$ 8 <sup>a</sup>                    | 14 $\pm$ 12 <sup>a</sup>                  |
| Anzahl juvenile Tiere    | 18 $\pm$ 12 <sup>a</sup>                 | 22 $\pm$ 10 <sup>a</sup>                  | 10 $\pm$ 12 <sup>a</sup>                  | 19 $\pm$ 6 <sup>a</sup>                   |
| sonstige (n.best.)       | 0 $\pm$ 0 <sup>a</sup>                   | 0 $\pm$ 0 <sup>a</sup>                    | 1 $\pm$ 2 <sup>a</sup>                    | 0 $\pm$ 0 <sup>a</sup>                    |
| Anzahl Tiere ges.        | 22 $\pm$ 10 <sup>a</sup>                 | 27 $\pm$ 14 <sup>a</sup>                  | 20 $\pm$ 19 <sup>a</sup>                  | 33 $\pm$ 15 <sup>a</sup>                  |
| <b>A. chlorotica</b>     |  |   |   |   |
| Anzahl adulte Tiere      | 3 $\pm$ 4 <sup>a</sup>                   | 11 $\pm$ 14 <sup>a</sup>                  | 4 $\pm$ 8 <sup>a</sup>                    | 4 $\pm$ 8 <sup>a</sup>                    |
| Anzahl juvenile Tiere    | 2 $\pm$ 2 <sup>a</sup>                   | 5 $\pm$ 10 <sup>a</sup>                   | 3 $\pm$ 6 <sup>a</sup>                    | 3 $\pm$ 6 <sup>a</sup>                    |
| sonstige (n.best.)       | 1 $\pm$ 2 <sup>a</sup>                   | 0 $\pm$ 0 <sup>a</sup>                    | 0 $\pm$ 0 <sup>a</sup>                    | 0 $\pm$ 0 <sup>a</sup>                    |
| Anzahl Tiere ges.        | 6 $\pm$ 8 <sup>a</sup>                   | 16 $\pm$ 23 <sup>a</sup>                  | 7 $\pm$ 14 <sup>a</sup>                   | 7 $\pm$ 14 <sup>a</sup>                   |
| <b>A. spec.</b>          |  |   |   |   |
| Anzahl adulte Tiere      | 0 $\pm$ 0 <sup>a</sup>                   | 0 $\pm$ 0 <sup>a</sup>                    | 0 $\pm$ 0 <sup>a</sup>                    | 0 $\pm$ 0 <sup>a</sup>                    |
| Anzahl juvenile Tiere    | 1 $\pm$ 2 <sup>a</sup>                   | 0 $\pm$ 0 <sup>a</sup>                    | 2 $\pm$ 2 <sup>a</sup>                    | 0 $\pm$ 2 <sup>a</sup>                    |
| sonstige (n.best.)       | 1 $\pm$ 2 <sup>a</sup>                   | 3 $\pm$ 4 <sup>a</sup>                    | 1 $\pm$ 2 <sup>a</sup>                    | 3 $\pm$ 4 <sup>a</sup>                    |
| Anzahl Tiere ges.        | 2 $\pm$ 2 <sup>a</sup>                   | 3 $\pm$ 4 <sup>a</sup>                    | 3 $\pm$ 2 <sup>a</sup>                    | 3 $\pm$ 4 <sup>a</sup>                    |
| <b>L. terrestris</b>     |  |   |   |   |
| Anzahl adulte Tiere      | 0 $\pm$ 0 <sup>a</sup>                   | 0 $\pm$ 0 <sup>a</sup>                    | 0 $\pm$ 0 <sup>a</sup>                    | 0 $\pm$ 0 <sup>a</sup>                    |
| Anzahl juvenile Tiere    | 0 $\pm$ 0 <sup>a</sup>                   | 0 $\pm$ 0 <sup>a</sup>                    | 0 $\pm$ 0 <sup>a</sup>                    | 2 $\pm$ 2 <sup>a</sup>                    |
| sonstige (n.best.)       | 0 $\pm$ 0 <sup>a</sup>                   | 0 $\pm$ 0 <sup>a</sup>                    | 0 $\pm$ 0 <sup>a</sup>                    | 0 $\pm$ 0 <sup>a</sup>                    |
| Anzahl Tiere ges.        | 0 $\pm$ 0 <sup>a</sup>                   | 0 $\pm$ 0 <sup>a</sup>                    | 0 $\pm$ 0 <sup>a</sup>                    | 2 $\pm$ 2 <sup>a</sup>                    |
| <b>Summe</b>             |  |   |   |   |
| Anzahl adulte Tiere      | 7 $\pm$ 6 <sup>a</sup>                   | 16 $\pm$ 14 <sup>a</sup>                  | 13 $\pm$ 8 <sup>a</sup>                   | 18 $\pm$ 16 <sup>a</sup>                  |
| Anzahl juvenile Tiere    | 21 $\pm$ 11 <sup>a</sup>                 | 27 $\pm$ 18 <sup>a</sup>                  | 15 $\pm$ 12 <sup>a</sup>                  | 24 $\pm$ 8 <sup>a</sup>                   |
| sonstige (n.best.)       | 2 $\pm$ 2 <sup>a</sup>                   | 3 $\pm$ 4 <sup>a</sup>                    | 2 $\pm$ 2 <sup>a</sup>                    | 3 $\pm$ 4 <sup>a</sup>                    |
| <b>Anzahl Tiere ges.</b> | <b>30 <math>\pm</math> 8<sup>a</sup></b> | <b>46 <math>\pm</math> 31<sup>a</sup></b> | <b>30 <math>\pm</math> 20<sup>a</sup></b> | <b>45 <math>\pm</math> 26<sup>a</sup></b> |
| <b>Kokons gesamt</b>     | <b>8 <math>\pm</math> 10<sup>a</sup></b> | <b>30 <math>\pm</math> 18<sup>a</sup></b> | <b>41 <math>\pm</math> 36<sup>a</sup></b> | <b>36 <math>\pm</math> 28<sup>a</sup></b> |

Während die Bodentemperaturen mit 9 bis 12 °C im optimalen Bereich lagen, war der Wassergehalt des Bodens aufgrund der geringen Niederschläge im April mit einem mittleren TS-Gehalt von 89 % insbesondere für *A. caliginosa* suboptimal (Wragge, 2014; Edwards und Bohlen, 1996; Lee, 1985). Regenwürmer geben über die Haut viel Feuchtigkeit ab und sind deshalb sehr abhängig von den Feuchtebedingungen in ihrer Umgebung. Unter trockenen Bedingungen graben sie sich tiefer in den Boden und verharren dort (KiyasudeenS *et al.*, 2016). Es ist deshalb davon auszugehen, dass zum Zeitpunkt der Probenahme auf dem gesamten Versuchsfeld nicht die maximale Regenwurmaktivität abgebildet werden konnte. Eine Interpretation der Ergebnisse sollte deshalb mit Vorsicht erfolgen. Es ist jedoch festzuhalten, dass durch die Anwendung der Gärprodukte im Vergleich zur ungedüngten Kontrolle keine Reduktion der Regenwurmabundanz festgestellt wurde. Die Anzahl an Kokons war mit durchschnittlich 36 je  $m^2$  in den mit Gärprodukten behandelten Parzellen deutlich größer als in der Kontrolle (8 Kokons  $m^{-2}$ ). Auch bei diesem Parameter konnten jedoch keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten

festgestellt werden. Nach zwei Ausbringungen im Jahr 2014 haben die Gärprodukte somit nicht zu einer Einschränkung der Fortpflanzungsaktivität geführt. Die Ergebnisse lassen eher einen positiven Effekt durch die Gärprodukt-Anwendung vermuten, der auf die Zufuhr an organischer Substanz als Nahrungsgrundlage zurückzuführen sein dürfte.

### 3.2.4 Schlussfolgerungen

In Hinblick auf die Gärprodukte lassen sich aus den verschiedenen Untersuchungen mit Regenwürmern folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Die Anwendung der Gärprodukte führt mindestens kurzfristig zu einer leichten Erhöhung des Boden-pH-Wertes. Dieser Effekt ist umso größer, je höher die Aufwandmenge ist. In den hier durchgeführten Versuchen bewegte sich die pH-Verschiebung innerhalb des für Regenwürmer akzeptablen Bereichs.
- In den Versuchen mit *Eisenia fetida* konnte keine Einschränkung der Habitatfunktion durch die Anwendung der Gärprodukte festgestellt werden. Die Regenwürmer wurden im Gegenteil eher von den Gärprodukten angezogen, was vermutlich auf der Bereitstellung an organischer Substanz als Nahrungsquelle beruht. *A. caliginosa* zeigte demgegenüber eine deutliche Ablehnung des mit Feinfraktion (hohe Aufwandmenge) gedüngten Bodens und eine insgesamt geringere Bevorzugung der Gärprodukte. Aufgrund der zum Teil gegensätzlichen Reaktion der beiden Arten kann den Gärprodukten auf der Basis der Vermeidungstests keine eindeutig positive oder negative Wirkung auf in Ackerböden lebende Regenwürmer zugeschrieben werden. Weitere Untersuchungen zu möglichen Kontaminationen mit Schadstoffen und zum Einfluss der Gärprodukte auf verschiedene Bodenorganismen sind notwendig, um eine umfassende Beurteilung der ökotoxikologischen Wirkung zu ermöglichen.
- Die Vermeidungstests mit Gärprodukten der Kategorie 2 lassen darauf schließen, dass die Zugabe von verschiedenen Stickstoffquellen zu einer Vermeidung der Gärprodukte durch Regenwürmer führt. Dieser Effekt hat je nach N-Quelle unterschiedliche Ursachen, zu denen hohe Konzentrationen an Ammonium-N und organischen Verbindungen gehören können. Durch die Beimengung von leicht verfügbaren Kohlenstoffquellen wie Stroh lässt sich die negative Wirkung minimieren.
- Im Feldversuch war die Wirkung der Gärprodukte auf die Regenwurmpopulation aufgrund der ungünstigen Witterungsbedingungen nicht mit Sicherheit bestimmbar. Eine Beeinträchtigung der Abundanz oder eine Verschiebung des Artenspektrums durch die Anwendung der Gärprodukte konnte nicht festgestellt werden. Die Anzahl der Kokons deutet eher darauf hin, dass sich die Applikation der Gärprodukte langfristig vorteilhaft auf die Regenwürmer auswirken könnte.
- Die Aufbereitungsform der Gärprodukte führte weder in den Vermeidungstests noch im Feldversuch zu signifikanten Unterschieden bei den Untersuchungsergebnissen.

### 3.3 Einfluss der Gärprodukte auf Wurzelmorphologie und bodenchemische Parameter

*Die Inhalte dieses Kapitels wurden bereits veröffentlicht in Ross et al. (2017a): "Biowaste Digestates: Influence of Pelletization on Nutrient Release and Early Plant Development of Oats" im Journal "Waste and Biomass Valorization".*

Die Wurzelentwicklung und damit die Struktur und Morphologie des Wurzelsystems werden sowohl genetisch, als auch durch die herrschenden Umweltbedingungen beeinflusst (Kumar *et al.*, 2014). Länge und Komplexität des Wurzelsystems sind dabei stark abhängig von Angebot und Verteilung von Pflanzennährstoffen im Boden. Pflanzen sind in der Lage, den Aufbau ihres Wurzelsystems so zu verändern, dass die räumliche Verfügbarkeit bestimmter Nährstoffe erheblich verbessert wird (Bachmann *et al.*, 2016). Forde und Lorenzo (2001) nannten dieses Phänomen „Tropomorphogenese“. Stickstoff- und Schwefelverbindungen, Phosphor und Eisen können als Trigger fungieren, durch deren Vorhandensein die Zellteilung und Zelldifferenzierung im Wurzelgewebe beeinflusst wird (López-Bucio *et al.*, 2003).

Die größte Rolle spielen dabei Stickstoff und Phosphor, wobei der Einfluss von Stickstoff auf die Wurzelentwicklung offensichtlich erheblich von anderen Begleitumständen wie Pflanzenart, Lagerungsdichte und pH-Wert des Bodens oder der Verfügbarkeit anderer Nährstoffe abhängt. Xue *et al.* (2014) haben gezeigt, dass ein erhöhtes N-Angebot Wurzellängendichte, Wurzeloberfläche und Wurzeltrockenmasse von Winterweizen erhöhen kann, wodurch auch die Aufnahme anderer Nährstoffe (in diesem Fall Zink) positiv beeinflusst wird. Głąb (2013) fand andererseits heraus, dass die Gabe von Stickstoff die Wurzeltrockenmasse und Wurzellängendichte eines Gras-Rotklee-Gemenges im Feld reduzierte.

Ein Phosphordefizit im Boden führt in der Regel zu einer stark erhöhten Wurzelhaardichte (Cao *et al.*, 2013; Ma *et al.*, 2001) und zur Ausbildung von längeren Seitenwurzeln. Das Längenwachstum der Hauptwurzeln wird im Gegensatz dazu durch Phosphormangel eher eingeschränkt, weil das Zellwachstum gehemmt wird (Williamson *et al.*, 2001).

Neben der Phosphor- und Stickstoffverfügbarkeit kann auch das Angebot an Kalium die Wurzelentwicklung beeinflussen. Kaliummangel führt zu reduziertem Wachstum der primären Seitenwurzeln und kann die Ausbildung von sekundären Seitenwurzeln und Wurzelhaaren komplett inhibieren (Cao *et al.*, 2013; Hackett, 1968).

#### 3.3.1 Zielstellung

Es wurde davon ausgegangen, dass aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzung der Gärprodukte und der verschiedenen Aufbereitungsformen Unterschiede in der Nährstoffverfügbarkeit auftreten würden und dass diese sich bedingt durch unterschiedliche Zerfallsgeschwindigkeiten über die Zeit ändern würden. Die Rhizoboxenversuche sollten dazu dienen, diese Unterschiede durch die jeweiligen Auswirkungen auf Wurzelmorphologie und chemische Eigenschaften des Bodens deutlich zu machen.

### 3.3.2 Material und Methoden

#### Gärprodukte und Boden

Für die Rhizoboxenversuche wurden im Jahr 2015 Gärprodukte der ersten Lieferung von Kategorie 1 verwendet. Getestet wurden die Feinfraktion, die Pellets und die Agglomerate sowie zum Vergleich Kontrollboden ohne Beimengung von Gärprodukten.

Der verwendete Boden (lehmiger Sand) stammte aus der Krume einer Ackerfläche der Lehr- und Forschungsstation der Humboldt-Universität zu Berlin in Berlin-Dahlem (52° 28' N; 13° 18' E). Der Boden wurde luftgetrocknet und gesiebt (4 mm). Die wichtigsten chemischen Parameter sind in Tabelle 18 dargestellt.

Tabelle 18: Chemische Eigenschaften des für die Rhizoboxenversuche verwendeten Bodens

| Parameter | N <sub>ges</sub> | C <sub>ges</sub> | C <sub>org</sub> | C <sub>hwl</sub>      | P <sub>DL</sub> | K <sub>DL</sub> | pH-Wert |
|-----------|------------------|------------------|------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|---------|
|           | (% TM)           |                  |                  | (g kg <sup>-1</sup> ) |                 |                 |         |
| Boden     | 0,06             | 1,60             | 0,98             | 0,41                  | 0,46            | 0,12            | 6,58    |

#### Versuchsdesign

Das Versuchsdesign orientierte sich an den Untersuchungen, wie sie von Reibe *et al.* (2014) beschrieben wurden. In diesem System werden Rhizoboxen verwendet, in denen Wurzelbereich und Boden durch Nylongaze (1 µm Maschenweite, Heidland GmbH & Co. KG, Deutschland) getrennt sind (Abbildung 10). Die Nylongaze erlaubt den Austausch von Nährstoffen und Wasser, unterbindet jedoch den Kontakt zwischen Wurzeln und Boden bzw. Gärprodukten. Dadurch wird unter anderem verhindert, dass Wurzeln in die Gärprodukte hinein wurzeln, was eine genaue Erfassung von Wurzellänge und Wurzelverzweigungen erschweren würde.

In jeder Rhizobox wurden zwei Rahmen mit Nylongaze installiert. Zwischen den beiden Gazestücken wurde jeweils eine vier Tage vorgekeimte Haferpflanze (*Avena sativa* L., cv. Max, Berthold Bauer/I.G. Pflanzenzucht, Deutschland) eingesetzt. Jede Behandlung wurde dreifach wiederholt (gesamt 12 Boxen mit 24 Haferpflanzen). Die Rhizoboxen wurden im Gewächshaus aufgestellt (Temperaturdurchschnitt 21 °C, relative Luftfeuchtigkeit 40-50 %, Tageslänge 14 h).

#### Probenahme

Die Pflanzen wurden jeweils 21 Tage nach dem Einsetzen in die Boxen geerntet (BBCH-Stadium 21-23, Beginn der Bestockung (Meier, 2001)). Der Versuch wurde drei Mal nacheinander mit derselben Boden-Gärprodukt-Mischung durchgeführt. Zwischen den Versuchsdurchgängen wurden die Rhizoboxen so abgedeckt, dass ein Luftaustausch in geringem Maße möglich war. Der Boden wurde durchgängig feucht gehalten, um eine fortgesetzte Biodegradation der Gärprodukte zu ermöglichen. Die Ernten wurden mit drei, sieben und achtundzwanzig Wochen Abstand zum ursprünglichen Versuchsansatz durchgeführt.

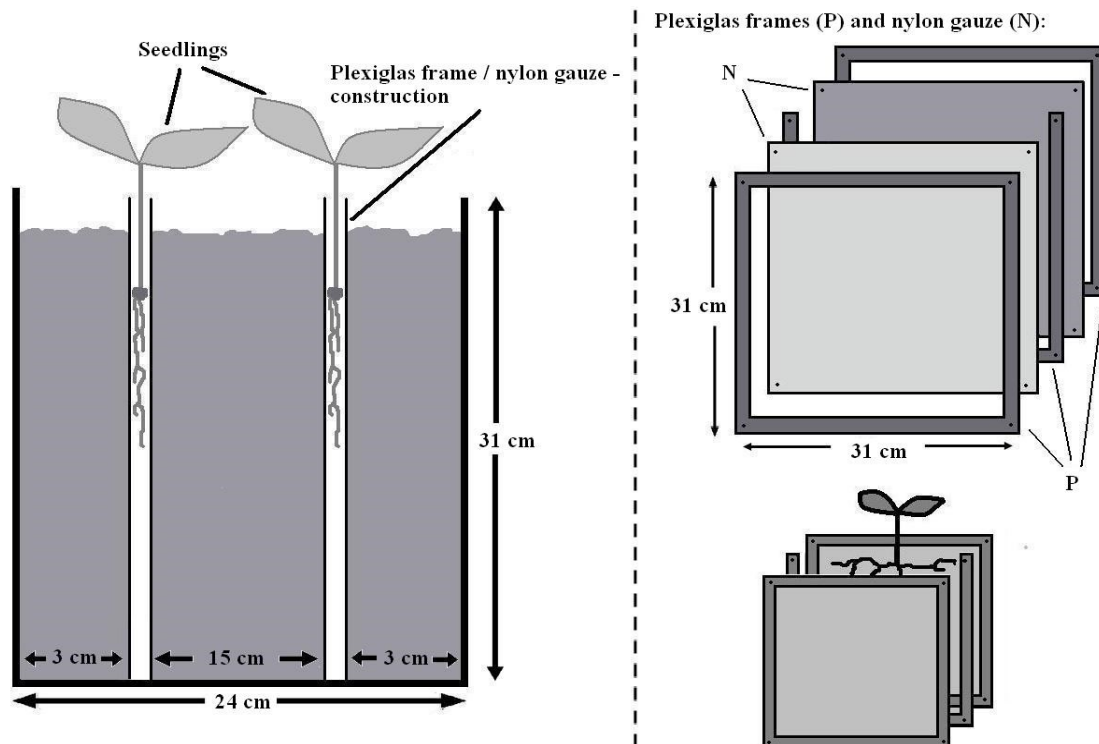


Abbildung 10: Schematische Darstellung der verwendeten Rhizoboxen (Reibe *et al.*, 2014)

Bei der Ernte wurden Spross und Wurzel direkt oberhalb der Bodenoberfläche getrennt. Der Spross wurde bei 60 °C über 48 Stunden getrocknet und zur Bestimmung der Trockenmasse gewogen. Die Wurzeln wurden mit den Rahmen entnommen, vorsichtig gewaschen und anschließend auf eine schwarze Holzplatte übertragen (Abbildung 11).



Abbildung 11: Wurzelaufnahmen für die spätere Analyse mit der WinRHIZO-Software. Beispiele mit Pellet (links) und Feinfraktion (rechts) aus der dritten Ernte 2015 [Fotos: Roß]

Vor diesem dunklen Hintergrund wurden sie mit einer Digitalkamera fotografiert (Canon EOS 1200D digitale Spiegelreflexkamera mit EF-S 18-55mm 1:3,5-5,6 IS II Objektiv) und danach analog zum Spross getrocknet und gewogen. Die Wurzelaufnahmen wurden später mit Hilfe der WinRHIZO 2012b Software (Regent Instruments, Quebec, Canada) analysiert.

Bei jeder Ernte wurden mit einem Bohrstock Bodenproben aus den Rhizoboxen entnommen. Diese wurden luftgetrocknet, auf 2 mm gesiebt und als Mischproben in Doppelbestimmung auf ihre Gehalte an Gesamtkohlenstoff und -stickstoff, organischem Kohlenstoff, heißwasserlöslichem Kohlenstoff, Phosphor und Kalium und auf ihren pH-Wert untersucht. Die Analysenmethoden wurden bereits in Kapitel 3.4 (Gefäßversuche) beschrieben.

### Statistische Analyse

Die Ergebnisse von Wurzel- und Sprossbiomasse wurden mit Hilfe von SPSS Statistics Desktop 20.0 für Windows auf signifikante Unterschiede untersucht (einfaktorielle ANOVA gefolgt vom Tukey's HSD Test ( $P \leq 0.05$ )). Die Ergebnisse der Bodenuntersuchungen sind Mittelwerte aus zwei Messwiederholungen.

## 3.3.3 Ergebnisse und Diskussion

### 3.3.3.1 Auswirkungen auf die Bodeneigenschaften

#### *Kohlenstoffgehalt*

Die Gärproduktanwendung führte generell zu einem Anstieg des Gesamtkohlenstoffgehalts zu den ersten beiden Ernteterminen im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle. Am letzten Erntetermin war ein erhöhter Gesamtkohlenstoffgehalt nur noch bei den mit Feinfraktion behandelten Varianten zu verzeichnen (Tabelle 19).

Der Gehalt an organischem Kohlenstoff wurde vor allem durch die Applikation der Feinfraktion erhöht, wobei die höchsten Ergebnisse mit 1,2 % am ersten Erntetermin beobachtet wurden. Der Gehalt an heißwasserlöslichem Kohlenstoff wurde durch alle Gärprodukte erhöht, wobei am ersten Erntetermin nur durch die Feinfraktion ein deutlicher Anstieg von  $0,13 \text{ g kg}^{-1}$  zu verzeichnen war. Am zweiten und dritten Termin lagen die Werte aller Gärprodukte zwischen  $0,10$  und  $0,12 \text{ g kg}^{-1}$  über den Werten der Kontrolle. Der Gehalt an heißwasserlöslichem Kohlenstoff ist ein Maß für den umsetzbaren Kohlenstoff und wird in der Regel mit einem hohen Humusreproduktionspotential assoziiert (Kluge *et al.*, 2008; Merbach *et al.*, 1999). Die Applikation von kompostierten Gärresten aus Bioabfällen könnte somit geeignet erscheinen, um den Gehalt an organischer Bodensubstanz langfristig zu erhöhen.

#### *Stickstoffgehalt*

Der Gehalt an Gesamtstickstoff wurde durch die Zugabe der Gärprodukte kaum verändert. Dies liegt unter anderem an dem geringen Gehalt an Ammonium-Stickstoff in den Gärprodukten, welcher ein generelles Problem kompostierter und luftgetrockneter Gärreste ist (Möller und Müller, 2012; Rivard *et al.*, 1995). Die Mobilisierung des restlichen organisch gebundenen Stickstoffs wurde offensichtlich durch die Agglomeration bzw. Pelletierung zusätzlich behindert, was zu den Forschungsergebnissen von Chiyoka *et al.* (2014) und Hammac *et al.* (2007) passt, die aufgrund der drohenden Stickstoffimmobilisierung grundsätzlich von einer Pelletierung von Gärresten abraten.

Tabelle 19: Chemischer Status des Bodens 3, 7 und 28 Wochen nach der Applikation der Gärprodukte. Daten sind Mittelwerte aus Doppelbestimmungen.

| Wochen nach der Applikation | Parameter        | Einheit            | Kontrolle | Pellets | Agglomerate | Fein-fraktion |
|-----------------------------|------------------|--------------------|-----------|---------|-------------|---------------|
| 3                           | N <sub>ges</sub> | % TM               | 0,06      | 0,07    | 0,07        | 0,09          |
|                             | C <sub>ges</sub> | % TM               | 1,57      | 1,70    | 1,62        | 1,73          |
|                             | C <sub>org</sub> | % TM               | 0,99      | 1,04    | 1,06        | 1,20          |
|                             | C <sub>hwl</sub> | g kg <sup>-1</sup> | 0,51      | 0,54    | 0,54        | 0,64          |
|                             | P <sub>DL</sub>  | g kg <sup>-1</sup> | 0,47      | 0,47    | 0,46        | 0,49          |
|                             | K <sub>DL</sub>  | g kg <sup>-1</sup> | 0,13      | 0,23    | 0,24        | 0,29          |
|                             | pH               |                    | 6,55      | 6,63    | 6,72        | 6,72          |
| 7                           | N <sub>ges</sub> | % TM               | 0,07      | 0,08    | 0,08        | 0,08          |
|                             | C <sub>ges</sub> | % TM               | 1,50      | 1,65    | 1,58        | 1,69          |
|                             | C <sub>org</sub> | % TM               | 1,01      | 1,03    | 1,02        | 1,09          |
|                             | C <sub>hwl</sub> | g kg <sup>-1</sup> | 0,53      | 0,64    | 0,65        | 0,65          |
|                             | P <sub>DL</sub>  | g kg <sup>-1</sup> | 0,46      | 0,45    | 0,45        | 0,48          |
|                             | K <sub>DL</sub>  | g kg <sup>-1</sup> | 0,12      | 0,30    | 0,32        | 0,32          |
|                             | pH               |                    | 6,65      | 6,63    | 6,67        | 6,74          |
| 28                          | N <sub>ges</sub> | % TM               | 0,08      | 0,07    | 0,08        | 0,09          |
|                             | C <sub>ges</sub> | % TM               | 1,54      | 1,49    | 1,54        | 1,68          |
|                             | C <sub>org</sub> | % TM               | 0,99      | 1,02    | 1,05        | 1,15          |
|                             | C <sub>hwl</sub> | g kg <sup>-1</sup> | 0,36      | 0,48    | 0,46        | 0,48          |
|                             | P <sub>DL</sub>  | g kg <sup>-1</sup> | 0,50      | 0,49    | 0,48        | 0,53          |
|                             | K <sub>DL</sub>  | g kg <sup>-1</sup> | 0,14      | 0,38    | 0,37        | 0,37          |
|                             | pH               |                    | 6,62      | 6,72    | 6,69        | 6,70          |

#### *Phosphor- und Kaliumgehalt*

Mit mittleren Gehalten von 0,49, 0,48 und 0,53 g kg<sup>-1</sup> wurde der mit 0,46 g kg<sup>-1</sup> ohnehin schon hohe Phosphorgehalt im Boden durch die Applikation der Feinfraktion an allen Ernteterminen erhöht. Durch die anderen Gärprodukte wurde keine Veränderung des Phosphorgehaltes erzielt. Offensichtlich verhinderten Agglomeration bzw. Pelletierung nicht nur die Stickstoffmineralisation, sondern auch die Freisetzung des organisch gebundenen Phosphors; und dies nicht nur zu Beginn, sondern während der gesamten Versuchsdauer, d.h. über einen Zeitraum von mehreren Monaten hinweg. Der Gehalt an Kalium im Boden wurde demgegenüber durch die Gärprodukte deutlich erhöht, was am dritten Erntetermin in allen Behandlungen zu einer Verdreifachung der Gehalte gegenüber der Kontrolle führte. Dies ist insofern nicht überraschend, als Kalium in der Regel nicht in die strukturellen Komponenten der organischen Substanz eingebaut wird, sondern gelöst in der flüssigen Phase (z.B. im Zytosol) verbleibt und somit leicht aus Gärresten oder Stallmist ausgewaschen wird (Möller und Müller, 2012).

#### 3.3.3.2 Auswirkungen auf die Wurzelmorphologie und das Sprosswachstum

Die Applikation der Gärprodukte führte am ersten und dritten Erntetermin grundsätzlich zur Entwicklung längerer Wurzeln und einer größeren Wurzeloberfläche verglichen mit der unbehandelten Kontrolle, obwohl außer Kalium keine größeren Mengen an Nährstoffen aus den Produkten freigesetzt wurden (Tabelle 20). Kalium ist für die Wurzelentwicklung jedoch nur von

Tabelle 20: Parameter der Wurzelmorphologie 3, 7 und 28 Wochen nach der Applikation der Gärprodukte. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen innerhalb einer Zeile signifikante Unterschiede (Tukey's HSD Test,  $P \leq 0.05$ ).

| Wochen nach der Applikation | Parameter               | Einheit  | Kontrolle             | Feinfraktion          | Agglomerate           | Pellets               |
|-----------------------------|-------------------------|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 3                           | Wurzellänge             | cm   | 724,64 <sup>a</sup>   | 836,87 <sup>ab</sup>  | 860,11 <sup>ab</sup>  | 1011,42 <sup>b</sup>  |
|                             | Wurzelbiomasse          | g  | 0,08 <sup>a</sup>     | 0,10 <sup>a</sup>     | 0,12 <sup>a</sup>     | 0,11 <sup>a</sup>     |
|                             | Sprossbiomasse          | g  | 0,10 <sup>a</sup>     | 0,19 <sup>a</sup>     | 0,19 <sup>a</sup>     | 0,13 <sup>a</sup>     |
|                             | Spezifische Wurzellänge | Wurzellänge/Wurzelbiomasse (cm g <sup>-1</sup> )   | 9057,94 <sup>a</sup>  | 8368,74 <sup>a</sup>  | 7167,54 <sup>a</sup>  | 9194,73 <sup>a</sup>  |
|                             | Root/Shoot Ratio        | Wurzelbiomasse/Sprossbiomasse (g g <sup>-1</sup> ) | 0,80 <sup>a</sup>     | 0,53 <sup>a</sup>     | 0,63 <sup>a</sup>     | 0,85 <sup>a</sup>     |
|                             | Verhältnis Wurzellänge  | Wurzellänge/Sprossbiomasse (g g <sup>-1</sup> )    | 7246,36 <sup>ab</sup> | 4404,60 <sup>a</sup>  | 4526,87 <sup>a</sup>  | 7780,15 <sup>b</sup>  |
|                             | Wurzeloberfläche        | cm <sup>2</sup>                                    | 114,04 <sup>a</sup>   | 126,33 <sup>ab</sup>  | 142,23 <sup>ab</sup>  | 168,64 <sup>b</sup>   |
|                             | Wurzelspitzen           | Anzahl   | 805,00 <sup>a</sup>   | 1172,67 <sup>ab</sup> | 1075,17 <sup>ab</sup> | 1459,83 <sup>b</sup>  |
| 7                           | Wurzellänge             | cm   | 626,63 <sup>a</sup>   | 685,45 <sup>a</sup>   | 733,71 <sup>a</sup>   | 627,68 <sup>a</sup>   |
|                             | Wurzelbiomasse          | g  | 0,08 <sup>a</sup>     | 0,10 <sup>a</sup>     | 0,10 <sup>a</sup>     | 0,07 <sup>a</sup>     |
|                             | Sprossbiomasse          | g  | 0,14 <sup>a</sup>     | 0,16 <sup>a</sup>     | 0,15 <sup>a</sup>     | 0,11 <sup>a</sup>     |
|                             | Spezifische Wurzellänge | Wurzellänge/Wurzelbiomasse (cm g <sup>-1</sup> )   | 7832,90 <sup>a</sup>  | 6854,46 <sup>a</sup>  | 7337,14 <sup>a</sup>  | 8966,83 <sup>a</sup>  |
|                             | Root/Shoot Ratio        | Wurzelbiomasse/Sprossbiomasse (g g <sup>-1</sup> ) | 0,57 <sup>a</sup>     | 0,63 <sup>a</sup>     | 0,67 <sup>a</sup>     | 0,64 <sup>a</sup>     |
|                             | Verhältnis Wurzellänge  | Wurzellänge/Sprossbiomasse (g g <sup>-1</sup> )    | 4475,94 <sup>a</sup>  | 4284,04 <sup>a</sup>  | 4891,43 <sup>a</sup>  | 5706,17 <sup>a</sup>  |
|                             | Wurzeloberfläche        | cm <sup>2</sup>                                    | 101,85 <sup>a</sup>   | 103,82 <sup>a</sup>   | 120,68 <sup>a</sup>   | 99,70 <sup>a</sup>    |
|                             | Wurzelspitzen           | Anzahl   | 807,83 <sup>a</sup>   | 828,50 <sup>a</sup>   | 962,33 <sup>a</sup>   | 580,50 <sup>a</sup>   |
| 28                          | Wurzellänge             | cm   | 654,12 <sup>a</sup>   | 750,52 <sup>a</sup>   | 771,90 <sup>a</sup>   | 704,12 <sup>a</sup>   |
|                             | Wurzelbiomasse          | g  | 0,05 <sup>a</sup>     | 0,07 <sup>a</sup>     | 0,08 <sup>a</sup>     | 0,07 <sup>a</sup>     |
|                             | Sprossbiomasse          | g  | 0,14 <sup>a</sup>     | 0,15 <sup>a</sup>     | 0,16 <sup>a</sup>     | 0,15 <sup>a</sup>     |
|                             | Spezifische Wurzellänge | Wurzellänge/Wurzelbiomasse (cm g <sup>-1</sup> )   | 13082,45 <sup>a</sup> | 10721,71 <sup>a</sup> | 9648,75 <sup>a</sup>  | 10058,92 <sup>a</sup> |
|                             | Root/Shoot Ratio        | Wurzelbiomasse/Sprossbiomasse (g g <sup>-1</sup> ) | 0,36 <sup>a</sup>     | 0,47 <sup>a</sup>     | 0,50 <sup>a</sup>     | 0,47 <sup>a</sup>     |
|                             | Verhältnis Wurzellänge  | Wurzellänge/Sprossbiomasse (g g <sup>-1</sup> )    | 4672,30 <sup>a</sup>  | 5003,47 <sup>a</sup>  | 4824,38 <sup>a</sup>  | 4694,16 <sup>a</sup>  |
|                             | Wurzeloberfläche        | cm <sup>2</sup>                                    | 98,25 <sup>a</sup>    | 116,94 <sup>a</sup>   | 125,31 <sup>a</sup>   | 112,60 <sup>a</sup>   |
|                             | Wurzelspitzen           | Anzahl   | 789,67 <sup>a</sup>   | 948,33 <sup>a</sup>   | 959,33 <sup>a</sup>   | 1269,83 <sup>a</sup>  |



geringer Bedeutung. Neben der reinen Zufuhr an Nährstoffen sind offensichtlich andere Eigenschaften der Kompostprodukte ebenfalls von Bedeutung für die Pflanzen- bzw. Wurzelentwicklung. Die Ergebnisse bestätigen die Resultate von Lazcano *et al.* (2009), die berichteten, dass bereits eine geringe Menge an Kompost im Wuchsmedium zu signifikanten Steigerungen bei der Wurzel- und Sprossbiomasse, dem Wurzelvolumen und der Anzahl der Wurzelverzweigungen bei Tomatenpflanzen führte. Trinchera *et al.* (2015) beobachteten ebenfalls eine Zunahme von Adventivwurzeln und eine gleichmäßigere Ausbildung von meristematischen Zellen an den Wurzelspitzen von Orangenbäumen durch die Applikation von Kompost aus Gartenabfällen. Sie stellten einen direkten Zusammenhang zwischen der veränderten Wurzelmorphologie und der Zufuhr an organischem Kohlenstoff her.

Das Verhältnis von Wurzel- zu Sprossbiomasse (Root/Shoot Ratio) war für die Pflanzen der Kontrolle und die mit Pellets versorgten Pflanzen am ersten Erntetermin doppelt so hoch wie am letzten Termin. Verglichen damit zeigten die mit Agglomeraten und Feinfraktion gedüngten Pflanzen einen geringeren Abfall der Root/Shoot Ratio vom ersten zum dritten Erntetermin hin. Wang *et al.* (2014) kamen zu dem Schluss, dass Stress, ob durch Wasser- oder durch Nährstoffmangel ausgelöst, grundsätzlich einen großen Einfluss auf die ober- und unterirdische Pflanzenentwicklung besitzt und in der Regel zu einem Anstieg der Root/Shoot Ratio führt. Da in diesem Experiment die Wasserversorgung durchweg ausreichend war, wäre dementsprechend davon auszugehen, dass Stress vor allem durch Nährstoffmangel ausgelöst wurde und dass dieser für die Pellet- und Kontrollpflanzen am ersten Erntetermin am größten war. Die Ergebnisse der Bodenanalyse zeigen jedoch nur zwischen den Behandlungen mit Feinfraktion und der Kontrolle deutliche Unterschiede für die Parameter  $C_{org}$ ,  $C_{hwl}$ , N und  $K_{DL}$ . Die Ursache für die hohe Root/Shoot Ratio in den Pellet-Varianten bleibt somit zunächst unklar. Weitere Versuche mit einem stärkeren Fokus auf bodenchemische Parameter und einer Probenanzahl, die eine statistische Auswertung erlaubt, könnten zu einer Klärung des beobachteten Phänomens beitragen. Wurzellänge, Wurzeloberfläche und Anzahl der Wurzelspitzen waren bei den mit Pellets gedüngten Pflanzen zum ersten Erntetermin signifikant größer bzw. höher als bei den Pflanzen der unbehandelten Kontrolle. Das Verhältnis von Wurzellänge zu Sprossbiomasse war zu diesem Zeitpunkt ebenfalls bei den mit Pellets versorgten Pflanzen am größten und bei den mit Agglomeraten gedüngten Pflanzen signifikant am niedrigsten.

Zum zweiten und dritten Erntetermin konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Behandlungen festgestellt werden.

Offensichtlich wurde nur während der ersten Wochen nach der Applikation eine Menge an Nährstoffen freigesetzt, die ausreichte, um die Wurzelmorphologie signifikant zu beeinflussen. Der Effekt war dabei für die Pellets am größten. Ursache hierfür ist möglicherweise nährstoffhaltiger Staub, der den Pellets von außen anhaftet und aus dem relativ schnell Nährstoffe mobilisiert werden konnten. Pellets sind oft mit Staub bedeckt, da sie, im Gegensatz zu runden Agglomeraten, scharfe Kanten besitzen, von denen während des Transports immer wieder kleinere Partikel abbrechen (Kozicki und Carlson, 2015).

In den Monaten nach der ersten Ernte fand eine Nährstofffreisetzung nur noch aus der Feinfraktion in Form von Phosphor und kleinen Mengen an Stickstoff statt. Die abgegebenen Mengen reichten jedoch nicht aus, um die Wurzelentwicklung der Pflanzen deutlich zu beeinflussen. Für den Phosphor gilt dies insbesondere, weil die Phosphorgehalte des Bodens auch vor der Applikation schon sehr hoch waren und kein Mangel vorherrschte, der durch die Düngung hätte behoben werden können.

### 3.3.4 Schlussfolgerungen

Zusammenfassend lassen sich aus den Rhizoboxversuchen folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Die Applikation von Gärprodukten kann das Wurzelwachstum fördern. Im hier präsentierten Versuch führte vor allem die Anwendung der Pellets zu einer vermehrten Wurzelbildung im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle. Dies zeigte sich in Form von größerer Wurzellänge und Wurzeloberfläche sowie in einer erhöhten Anzahl an Wurzelspitzen.
- Die Gärproduktapplikation führte nur in den ersten Wochen nach Anwendung zu einer Nährstofffreisetzung, die ausreichte, um die Wurzelmorphologie signifikant zu beeinflussen.
- Die Aufbereitungsart beeinflusst die Wirkung der Gärprodukte auf die Pflanzenentwicklung, wobei die Wirkungsmechanismen in weiteren Versuchen genauer untersucht werden müssten.
- Pelletierung und Agglomeration können die Transportwürdigkeit und Lagerfähigkeit von Gärresten verbessern. Sie führen jedoch zu einer Immobilisierung von Nährstoffen und organischer Substanz. In diesem Versuch zerfielen die aufbereiteten Gärprodukte nur langsam und die Nährstofffreisetzung, insbesondere von Stickstoff, war marginal.
- Die Düngewirkung der agglomerierten bzw. pelletierten Gärprodukte muss als stark limitiert eingeschätzt werden, ungeachtet von ihrem tatsächlichen Nährstoffgehalt.
- Die Applikation der Gärprodukte führte zu einer Erhöhung der Gehalte an Gesamtkohlenstoff und vor allem heißwasserlöslichem Kohlenstoff. Die Gärprodukte scheinen demnach geeignet, um den Gehalt an organischer Substanz im Boden langfristig zu erhöhen.

### 3.4 Phytotoxische Wirkungen der Gärprodukte

Phytotoxikologische Tests stellen neben Vermeidungstests mit Regenwürmern und mikrobiologischen Untersuchungen eines von drei wesentlichen ökotoxikologischen Testverfahren für potentiell kontaminierte Böden dar (Kumpiene *et al.*, 2014). Physiologische und morphologische Parameter wie Keimung, Aufgang, Wuchshöhe, Blattfläche und Biomasseertrag können dabei zur Bewertung der Phytotoxizität des zu testenden Materials herangezogen werden, wobei der Test in der Regel nach spätestens 28 Tagen abgeschlossen wird (Kumpiene *et al.*, 2014; Wadhia und Thompson, 2007).

#### 3.4.1 Zielstellung

Durch phytotoxikologische Tests im Klimaschrank und mit Gefäßversuchen im Gewächshaus sollten die Düngewirkung sowie mögliche Schadstoffwirkungen der Gärprodukte auf Pflanzen untersucht und eventuelle Unterschiede zwischen den verschiedenen Produkten aufgezeigt werden. Die Pflanzenverträglichkeitstests dienten im Rahmen dieser Arbeit dazu, die Wirkung verschiedener, auch sehr hoher, Aufwandmengen auf das Keimverhalten und die frühe Jugendentwicklung der Pflanzen zu untersuchen.

In den phytotoxikologischen Tests wie auch in den Gefäßversuchen sollte die Wirkung der Gärprodukte auf mono- wie auf dikotyle Pflanzen untersucht werden. Aus diesem Grund wurden Hafer (*Avena sativa* L.) und Rübsen (*Brassica rapa* L.) bzw. Raps (*Brassica napus* L.) als Testpflanzen gewählt.

#### 3.4.2 Material und Methoden

##### Versuchsanlage

Die phytotoxikologischen Tests wurden entsprechend der ISO Norm 11269-2:2012 durchgeführt. Quadratische Gefäße mit einer Grundfläche von 10\*10 cm wurden jeweils mit 600 g Boden befüllt. Ein Verlust von Boden oder das Herauswurzeln der Pflanzen durch Löcher im Gefäßboden wurde durch eingelegtes Filterpapier verhindert. Pro Test, d.h. pro Charge Gärprodukte, wurden in zwei vom Aufbau her identischen zweifaktoriellen Versuchen die Faktoren A (Düngeprodukt) und B (Aufwandmenge, bezogen auf den Stickstoffgehalt) getestet. Ein Versuch wurde dabei mit Hafer (*Avena sativa* L., cv. Max, Berthold Bauer/I.G. Pflanzenzucht, Deutschland) durchgeführt, der andere mit Rübsen (*Brassica rapa* L. *silvestris* (LAM.) Briggs, cv. Buko, KWS Saat, Deutschland). Pro Gefäß wurden 10 Körner ausgesät. Nach dem Auflaufen wurde auf 5 Pflanzen je Gefäß vereinzelt.

Die Versuche sind in einem Klimaschrank (Modell WB 2000 KHFL) der Firma mytron Bio- und Solartechnik GmbH (Heiligenstadt, Deutschland) durchgeführt (Abbildung 12) worden, in dem die Gefäße vollständig randomisiert aufgestellt waren. Während der Versuche herrschte eine mittlere Temperatur von  $23 \pm 3$  °C bei einer Beleuchtungsdauer von 16 h. 21 Tage nach Testbeginn

(definiert durch das Auflaufen von 50 % aller Pflanzen in den Kontrollgefäßen) wurden die Tests beendet.

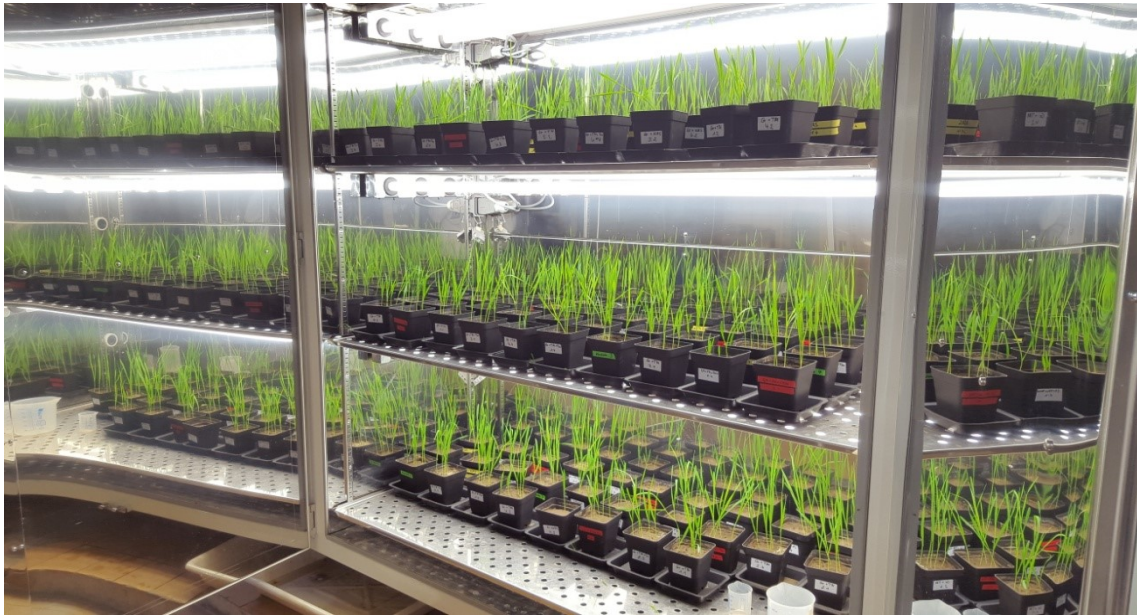


Abbildung 12: Aufbau des Phytotoxizitätstests mit Hafer im Klimaschrank

#### Gärprodukte und Aufwandmengen

Untersucht wurden drei Lieferungen der Gärprodukte der Kategorie 1 (Juni 2014, Juni 2015 und Oktober 2015), sowie ausgewählte Gärprodukte der Kategorie 2. Zum Vergleich wurden mit Kaliumammonsalpeter (KAS) gedüngte und ungedüngte (Kontrolle) Gefäße angesetzt. Alle Düngevarianten wurden in fünf Aufwandmengen getestet und alle Behandlungen vier Mal wiederholt, mit Ausnahme der Kontrolle, die gemäß den Empfehlungen der ISO-Norm acht Mal wiederholt wurde. Beim ersten Versuch mit der Lieferung Juni 2014 sollten diese Aufwandmengen einer Ausbringungsmenge von 100, 200, 400, 600 und 900 kg Stickstoff je ha entsprechen (Tabelle 21), da ursprünglich von einem deutlichen Düngeeffekt der Gärprodukte ausgegangen wurde. Die ersten Versuche wurden deshalb als Stickstoffdüngerversuch geplant. Für die Umrechnung der Produktmenge je Hektar auf die anzuwendende Produktmenge pro Gefäß wurden folgende Annahmen getroffen: Lagerungsdichte des Bodens =  $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ , Einarbeitungstiefe auf landwirtschaftlichen Flächen = 5 cm, Bodenmenge je Gefäß = 600 g.

Ab dem zweiten Versuch wurden die phytotoxikologischen Tests umgestellt und die Aufwandmenge nach der ausgebrachten Menge an Trockenmasse je Hektar berechnet (Vergleiche auch Kapitel 2 und 3.6). Zielgröße war eine Gärproduktmenge je Gefäß, die sich an den Ausbringungsmengen im Feldversuch orientierte und die Staffelung von 5 und  $10 \text{ t ha}^{-1}$  TM aufgriff. Im Ergebnis wurden Ausbringungsmengen von 5, 10, 15, 20 und  $25 \text{ t TM ha}^{-1}$  verwendet. Die Annahmen für die Umrechnung blieben die gleichen wie im ersten Versuch. Die Aufwandmengen für KAS wurden beibehalten wie im ersten Versuch, da mithilfe von KAS überprüft werden sollte, dass Durchführung und Verlauf der Versuche stets gleich erfolgten. Da aufgrund der unterschiedlichen Stickstoffgehalte eine Vergleichbarkeit mit den Gärprodukten im Jahr 2015 nicht gegeben war, wurden die KAS-Varianten in diesem Jahr nicht in die statistische Auswertung einbezogen.

Tabelle 21: Prüffaktoren in den phytotoxikologischen Tests

| <b>Test 1: Gärprodukt der Lieferung Juni 2014</b>                           |  |
|---|--|
| <b>Prüffaktor A:</b>  | <b>Düngeprodukt</b><br>a1 = Feinfraktion<br>a2 = Agglomerate<br>a3 = Pellets<br>a4 = Grobfraktion<br>a5 = Kalkammonsalpeter<br>a6 = Kontrolle  |
| <b>Prüffaktor B:</b>  | <b>Aufwandmenge</b><br>b1 = 100 kg ha <sup>-1</sup> N<br>b2 = 200 kg ha <sup>-1</sup> N<br>b3 = 400 kg ha <sup>-1</sup> N<br>b4 = 600 kg ha <sup>-1</sup> N<br>b5 = 900 kg ha <sup>-1</sup> N  |
| <b>Test 2 und 3: Gärprodukte der Lieferungen Juni 2015 und Oktober 2015</b> |  |
| <b>Prüffaktor A:</b>  | <b>Düngeprodukt</b><br>a1 = Feinfraktion<br>a2 = Agglomerate<br>a3 = Pellets<br>a4 = Grobfraktion<br>a5 = Kalkammonsalpeter<br>a6 = Kontrolle  |
| <b>Prüffaktor B:</b>  | <b>Aufwandmenge</b><br>b1 = 5 t ha <sup>-1</sup> TM bzw. 100 kg ha <sup>-1</sup> N (für KAS)<br>b2 = 10 t ha <sup>-1</sup> TM bzw. 200 kg ha <sup>-1</sup> N (für KAS)<br>b3 = 15 t ha <sup>-1</sup> TM bzw. 400 kg ha <sup>-1</sup> N (für KAS)<br>b4 = 20 t ha <sup>-1</sup> TM bzw. 600 kg ha <sup>-1</sup> N (für KAS)<br>b5 = 25 t ha <sup>-1</sup> TM bzw. 900 kg ha <sup>-1</sup> N (für KAS) |
| <b>Test 4: ausgewählte Gärprodukte der Kategorie 2 (2016)</b>               |  |
| <b>Prüffaktor A:</b>  | <b>Düngeprodukt</b><br>a1 = AggloGr + TM<br>a2 = AggloGr + TM + Ton<br>a3 = AggloGr + KAS<br>a4 = AggloGr + KAS + Ton<br>a5 = Kalkammonsalpeter<br>a6 = Kontrolle  |
| <b>Prüffaktor B:</b>  | <b>Aufwandmenge</b><br>b1 = 100 kg ha <sup>-1</sup> N<br>b2 = 200 kg ha <sup>-1</sup> N<br>b3 = 400 kg ha <sup>-1</sup> N<br>b4 = 600 kg ha <sup>-1</sup> N<br>b5 = 900 kg ha <sup>-1</sup> N  |

Für den vierten Test mit den Produkten der Kategorie 2 wurde zur Berechnung auf Basis der Stickstoffgehalte zurückgekehrt, da hier von einer deutlichen Wirkung des enthaltenen Stickstoffs ausgegangen wurde.

### Boden

Der Boden, welcher für den ersten Test verwendet wurde, stammte aus der Krume einer unbehandelten Kontrollfläche der Lehr- und Forschungsstation Thyrow der Humboldt-Universität zu Berlin (52° 16'N, 13° 12'E). Für die Tests 2 bis 4 wurde Boden vom Vorgewende der Fläche benutzt, auf der auch der Feldversuch durchgeführt wurde. Textur und chemische Eigenschaften sind bereits in Kapitel 3.1.2 (Tabelle 8) dargestellt.

## Untersuchungen

In allen Tests wurde vor dem Vereinzeln der Aufgang der Pflanzen bestimmt und gemäß ISO 11269-2:2012 in Prozent der Kontrolle berechnet. Nach 21 Tagen wurde die Wuchshöhe aller Pflanzen gemessen und der Mittelwert der jeweiligen Behandlung berechnet, sowie der Frisch- und Trockenmasseertrag je Gefäß bestimmt.

## Statistische Analyse

Die Ergebnisse wurden mit Hilfe von SPSS Statistics Desktop 20.0 für Windows auf signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen untersucht. Angewendet wurde eine einfaktorielle A-NOVA, gefolgt vom Tukey's HSD Test ( $P \leq 0.05$ ) für einen Vergleich aller Behandlungen innerhalb der einzelnen Aufwandmengen. Bei fehlender Varianzhomogenität wurde der Welch-Test, gefolgt vom Games-Howell-Test durchgeführt ( $P \leq 0.05$ ). Zur Untersuchung der Einflüsse der einzelnen Faktoren und möglicher Interaktionen wurde eine zweifaktorielle Varianzanalyse ebenfalls gefolgt vom Tukey's HSD Test ( $P \leq 0.05$ ) angewendet. Die Ergebnisse sind dargestellt als Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichungen.

### 3.4.3 Ergebnisse und Diskussion

Im ersten Versuch (Lieferung Juni 2014) wurde der Aufgang bei Rübsen durch die Gärprodukte im Vergleich zur Kontrolle kaum beeinflusst (Tabelle 22). Nur durch die Grobfraction kam es bei der Aufwandmenge  $400 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$  zu signifikanten Einschränkungen. Durch KAS wurde das Auflaufen ab der Aufwandmenge von  $400 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$  um mehr als die Hälfte reduziert, sowie die Wuchshöhe bei  $900 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$  gegenüber den Kontroll- und den mit Feinfraction und Pellet versorgten Pflanzen verringert. Bei Hafer wurde das Auflaufen durch die Gabe von KAS nicht signifikant beeinflusst, durch die Feinfraction aber tendenziell (bei  $400 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$  auch signifikant) beeinträchtigt. Eine Beeinflussung der Wuchshöhe zeigte sich auch bei Hafer vor allem durch KAS; bei  $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$  im positiven und ab  $600 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$  im signifikant negativen Sinne. Bei Rübsen führte die Feinfraction nach 21 Tagen zu geringeren Wuchshöhen in den ersten beiden Aufwandmengen. Unterschiede zwischen den Varianten mit Gärprodukten und der Kontrolle waren unabhängig von der Aufwandmenge weder bei Hafer noch bei Rübsen feststellbar. Bei den Trockenmasseerträgen war bei beiden Pflanzenarten ebenfalls kaum eine Beeinflussung durch die Gärprodukte zu verzeichnen. Die KAS-Düngung führte nur in der niedrigsten Aufwandmenge zu signifikanten Mehrerträgen gegenüber allen anderen Varianten (bei Rübsen) bzw. gegenüber der Feinfraction (bei Hafer). Ab  $600 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$  war bei beiden Pflanzenarten eine deutliche Reduzierung der Erträge durch die KAS-Gabe zu beobachten. Die zweifaktorielle Varianzanalyse wies bei Rübsen sowohl eine signifikante Wirkung der einzelnen Faktoren Düngeprodukt und Aufwandmenge, als auch signifikante Wechselwirkungen zwischen beiden nach (Tabelle A 3). Bei Hafer hatte nur die Aufwandmenge signifikanten Einfluss auf das Ergebnis.

Tabelle 22: Aufgang, Wuchshöhe und Biomasseertrag im phytotoxikologischen Test mit Gärprodukten der Kategorie 1 (Lieferung **Juni 2014**). Daten sind dargestellt als Mittelwerte  $\pm$  SD. Unterschiedliche Buchstaben innerhalb einer Spalte markieren signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen für diese Aufwandmenge für den jeweiligen Parameter (Tukey's HSD Test bzw. Games-Howell's Test (grau unterlegte Zellen),  $P \leq 0.05$ ).

| Pflanzenart                          |              | Rübsen                       |                               |                               |                               |                               | Hafer                         |                               |                               |                               |                              |
|--------------------------------------|--------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Aufwandmenge (kg ha <sup>-1</sup> N) |              | 100                          | 200                           | 400                           | 600                           | 900                           | 100                           | 200                           | 400                           | 600                           | 900                          |
| Aufgang<br>(% der Kontrolle)         | Kontrolle    | 100 $\pm$ 29 <sup>a</sup>    | 100 $\pm$ 29 <sup>a</sup>     | 100 $\pm$ 29 <sup>b</sup>     | 100 $\pm$ 29 <sup>ab</sup>    | 100 $\pm$ 29 <sup>b</sup>     | 100 $\pm$ 22 <sup>ab</sup>    | 100 $\pm$ 22 <sup>a</sup>     | 100 $\pm$ 22 <sup>b</sup>     | 100 $\pm$ 22 <sup>ab</sup>    | 100 $\pm$ 22 <sup>abc</sup>  |
|                                      | Feinfraktion | 110 $\pm$ 15 <sup>a</sup>    | 114 $\pm$ 20 <sup>a</sup>     | 99 $\pm$ 29 <sup>b</sup>      | 88 $\pm$ 19 <sup>ab</sup>     | 88 $\pm$ 15 <sup>b</sup>      | 61 $\pm$ 34 <sup>a</sup>      | 64 $\pm$ 41 <sup>ab</sup>     | 46 $\pm$ 29 <sup>a</sup>      | 43 $\pm$ 20 <sup>a</sup>      | 75 $\pm$ 24 <sup>a</sup>     |
|                                      | Agglomerate  | 118 $\pm$ 15 <sup>a</sup>    | 122 $\pm$ 25 <sup>a</sup>     | 99 $\pm$ 20 <sup>b</sup>      | 114 $\pm$ 29 <sup>b</sup>     | 107 $\pm$ 39 <sup>b</sup>     | 125 $\pm$ 18 <sup>b</sup>     | 136 $\pm$ 8 <sup>b</sup>      | 118 $\pm$ 7 <sup>b</sup>      | 129 $\pm$ 16 <sup>b</sup>     | 125 $\pm$ 18 <sup>bc</sup>   |
|                                      | Pellets      | 110 $\pm$ 26 <sup>a</sup>    | 95 $\pm$ 15 <sup>a</sup>      | 122 $\pm$ 25 <sup>b</sup>     | 107 $\pm$ 22 <sup>ab</sup>    | 80 $\pm$ 15 <sup>b</sup>      | 129 $\pm$ 0 <sup>b</sup>      | 111 $\pm$ 24 <sup>ab</sup>    | 132 $\pm$ 7 <sup>b</sup>      | 96 $\pm$ 32 <sup>ab</sup>     | 129 $\pm$ 16 <sup>c</sup>    |
|                                      | Grobfraktion | 114 $\pm$ 26 <sup>a</sup>    | 91 $\pm$ 18 <sup>a</sup>      | 42 $\pm$ 15 <sup>a</sup>      | 68 $\pm$ 20 <sup>ab</sup>     | 61 $\pm$ 33 <sup>ab</sup>     | 118 $\pm$ 24 <sup>b</sup>     | 107 $\pm$ 18 <sup>ab</sup>    | 129 $\pm$ 12 <sup>b</sup>     | 125 $\pm$ 7 <sup>b</sup>      | 96 $\pm$ 32 <sup>abc</sup>   |
|                                      | KAS          | 95 $\pm$ 26 <sup>a</sup>     | 80 $\pm$ 26 <sup>a</sup>      | 46 $\pm$ 12 <sup>a</sup>      | 49 $\pm$ 40 <sup>a</sup>      | 11 $\pm$ 15 <sup>a</sup>      | 100 $\pm$ 0 <sup>ab</sup>     | 79 $\pm$ 30 <sup>a</sup>      | 100 $\pm$ 31 <sup>b</sup>     | 86 $\pm$ 51 <sup>ab</sup>     | 82 $\pm$ 14 <sup>ab</sup>    |
| Wuchshöhe<br>(cm)                    | Kontrolle    | 12 $\pm$ 2 <sup>ab</sup>     | 12 $\pm$ 2 <sup>ab</sup>      | 12 $\pm$ 2 <sup>ab</sup>      | 12 $\pm$ 2 <sup>ab</sup>      | 12 $\pm$ 2 <sup>b</sup>       | 36 $\pm$ 3 <sup>ab</sup>      | 36 $\pm$ 3 <sup>ab</sup>      | 36 $\pm$ 3 <sup>a</sup>       | 36 $\pm$ 3 <sup>b</sup>       | 36 $\pm$ 3 <sup>bc</sup>     |
|                                      | Feinfraktion | 9 $\pm$ 1 <sup>a</sup>       | 9 $\pm$ 1 <sup>a</sup>        | 9 $\pm$ 1 <sup>a</sup>        | 9 $\pm$ 2 <sup>ab</sup>       | 10 $\pm$ 2 <sup>b</sup>       | 34 $\pm$ 4 <sup>a</sup>       | 33 $\pm$ 4 <sup>a</sup>       | 34 $\pm$ 5 <sup>ab</sup>      | 36 $\pm$ 2 <sup>b</sup>       | 40 $\pm$ 2 <sup>bc</sup>     |
|                                      | Agglomerate  | 13 $\pm$ 1 <sup>b</sup>      | 14 $\pm$ 3 <sup>b</sup>       | 10 $\pm$ 1 <sup>ab</sup>      | 10 $\pm$ 3 <sup>ab</sup>      | 8 $\pm$ 2 <sup>ab</sup>       | 38 $\pm$ 1 <sup>ab</sup>      | 40 $\pm$ 1 <sup>b</sup>       | 41 $\pm$ 1 <sup>b</sup>       | 38 $\pm$ 3 <sup>b</sup>       | 39 $\pm$ 0 <sup>bc</sup>     |
|                                      | Pellets      | 12 $\pm$ 2 <sup>ab</sup>     | 12 $\pm$ 2 <sup>ab</sup>      | 13 $\pm$ 1 <sup>b</sup>       | 13 $\pm$ 1 <sup>b</sup>       | 11 $\pm$ 1 <sup>b</sup>       | 39 $\pm$ 2 <sup>ab</sup>      | 39 $\pm$ 1 <sup>b</sup>       | 40 $\pm$ 2 <sup>ab</sup>      | 39 $\pm$ 2 <sup>b</sup>       | 40 $\pm$ 1 <sup>c</sup>      |
|                                      | Grobfraktion | 12 $\pm$ 1 <sup>ab</sup>     | 12 $\pm$ 2 <sup>ab</sup>      | 11 $\pm$ 2 <sup>ab</sup>      | 10 $\pm$ 3 <sup>ab</sup>      | 8 $\pm$ 1 <sup>ab</sup>       | 37 $\pm$ 1 <sup>ab</sup>      | 37 $\pm$ 1 <sup>ab</sup>      | 36 $\pm$ 3 <sup>ab</sup>      | 35 $\pm$ 2 <sup>ab</sup>      | 35 $\pm$ 3 <sup>b</sup>      |
|                                      | KAS          | 13 $\pm$ 2 <sup>b</sup>      | 12 $\pm$ 2 <sup>ab</sup>      | 10 $\pm$ 1 <sup>ab</sup>      | 8 $\pm$ 3 <sup>a</sup>        | 4 $\pm$ 3 <sup>a</sup>        | 41 $\pm$ 1 <sup>b</sup>       | 37 $\pm$ 3 <sup>ab</sup>      | 34 $\pm$ 6 <sup>ab</sup>      | 29 $\pm$ 4 <sup>a</sup>       | 21 $\pm$ 2 <sup>a</sup>      |
| Ertrag<br>(g je Gefäß TM)            | Kontrolle    | 0,28 $\pm$ 0,07 <sup>a</sup> | 0,28 $\pm$ 0,07 <sup>ab</sup> | 0,28 $\pm$ 0,07 <sup>b</sup>  | 0,28 $\pm$ 0,07 <sup>ab</sup> | 0,28 $\pm$ 0,07 <sup>b</sup>  | 0,33 $\pm$ 0,09 <sup>ab</sup> | 0,33 $\pm$ 0,09 <sup>ab</sup> | 0,33 $\pm$ 0,09 <sup>ab</sup> | 0,33 $\pm$ 0,09 <sup>ab</sup> | 0,33 $\pm$ 0,09 <sup>b</sup> |
|                                      | Feinfraktion | 0,23 $\pm$ 0,03 <sup>a</sup> | 0,17 $\pm$ 0,04 <sup>a</sup>  | 0,15 $\pm$ 0,01 <sup>a</sup>  | 0,25 $\pm$ 0,12 <sup>ab</sup> | 0,23 $\pm$ 0,10 <sup>b</sup>  | 0,22 $\pm$ 0,13 <sup>a</sup>  | 0,20 $\pm$ 0,11 <sup>a</sup>  | 0,18 $\pm$ 0,14 <sup>a</sup>  | 0,24 $\pm$ 0,04 <sup>ab</sup> | 0,31 $\pm$ 0,01 <sup>b</sup> |
|                                      | Agglomerate  | 0,33 $\pm$ 0,01 <sup>a</sup> | 0,31 $\pm$ 0,07 <sup>ab</sup> | 0,25 $\pm$ 0,05 <sup>b</sup>  | 0,27 $\pm$ 0,09 <sup>ab</sup> | 0,20 $\pm$ 0,10 <sup>ab</sup> | 0,38 $\pm$ 0,08 <sup>ab</sup> | 0,41 $\pm$ 0,09 <sup>b</sup>  | 0,46 $\pm$ 0,08 <sup>b</sup>  | 0,33 $\pm$ 0,04 <sup>ab</sup> | 0,39 $\pm$ 0,04 <sup>b</sup> |
|                                      | Pellets      | 0,33 $\pm$ 0,05 <sup>a</sup> | 0,30 $\pm$ 0,10 <sup>ab</sup> | 0,31 $\pm$ 0,02 <sup>b</sup>  | 0,34 $\pm$ 0,04 <sup>b</sup>  | 0,27 $\pm$ 0,02 <sup>b</sup>  | 0,39 $\pm$ 0,06 <sup>ab</sup> | 0,39 $\pm$ 0,05 <sup>b</sup>  | 0,39 $\pm$ 0,05 <sup>b</sup>  | 0,40 $\pm$ 0,09 <sup>b</sup>  | 0,40 $\pm$ 0,04 <sup>b</sup> |
|                                      | Grobfraktion | 0,28 $\pm$ 0,03 <sup>a</sup> | 0,31 $\pm$ 0,05 <sup>ab</sup> | 0,26 $\pm$ 0,01 <sup>b</sup>  | 0,22 $\pm$ 0,05 <sup>ab</sup> | 0,17 $\pm$ 0,08 <sup>ab</sup> | 0,33 $\pm$ 0,05 <sup>ab</sup> | 0,37 $\pm$ 0,03 <sup>b</sup>  | 0,33 $\pm$ 0,08 <sup>ab</sup> | 0,33 $\pm$ 0,06 <sup>ab</sup> | 0,34 $\pm$ 0,04 <sup>b</sup> |
|                                      | KAS          | 0,44 $\pm$ 0,06 <sup>b</sup> | 0,34 $\pm$ 0,12 <sup>b</sup>  | 0,23 $\pm$ 0,02 <sup>ab</sup> | 0,15 $\pm$ 0,10 <sup>a</sup>  | 0,05 $\pm$ 0,05 <sup>a</sup>  | 0,43 $\pm$ 0,10 <sup>b</sup>  | 0,29 $\pm$ 0,03 <sup>ab</sup> | 0,28 $\pm$ 0,07 <sup>ab</sup> | 0,23 $\pm$ 0,11 <sup>a</sup>  | 0,17 $\pm$ 0,03 <sup>a</sup> |

Im zweiten Versuch (Lieferung Juni 2015) wurde bei Hafer für Aufgang und Wuchshöhe eine signifikante Wirkung der Aufwandmenge der Gärprodukte nachgewiesen (Tabelle A 3). Dies führte jedoch bei keinem Parameter zu einem signifikanten Unterschied zwischen den Gärprodukten und der Kontrolle (Tabelle A 4). Phytotoxische Effekte traten somit nicht auf, allerdings war auch keine positive Beeinflussung des Pflanzenwachstums durch die Gärprodukte festzustellen. Bei Rübsen war im zweiten Versuch bei allen Varianten bereits der Aufgang stark eingeschränkt. Wuchshöhe und Ertrag schwankten innerhalb der Behandlungen erheblich, zumal es in einigen Gefäßen zum kompletten Absterben aller Pflanzen kam. Dies traf auch auf die Kontrollgefäße zu (Tabelle A 4). Laut ISO 11269-2:2012 (2012) ist der Test nur gültig, wenn in den Kontrollgefäßen wenigstens sieben von zehn Pflanzen aufleben. Auf eine weitere Auswertung wurde deshalb verzichtet. Als Ursache kommen Probleme bei der Bewässerung in Frage. Aufgrund des anderen Bodens wurde insbesondere beim Versuchsansatz die notwendige Bewässerungsmenge überschätzt. Beim nachfolgenden zweiten Versuchsteil mit Hafer wurde dies besser gehandhabt.

Im dritten Versuch (Lieferung Oktober 2015) zeigte sich bei Rübsen in den Aufwandmengen 20 bzw. 25 t ha<sup>-1</sup> TM eine signifikante Beeinträchtigung des Aufgangs durch Feinfraktion und Agglomerate. Bei Hafer wurde der Aufgang durch die Gärprodukte nicht beeinflusst (Tabelle 23). Die Wuchshöhe wurde sowohl bei Rübsen als auch bei Hafer durch die niedrige Aufwandmenge an Feinfraktion erhöht. Bei Rübsen führten zudem auch 10 und 15 t ha<sup>-1</sup> TM der Grobfraktion zu größeren Pflanzen, verglichen mit den anderen Gärprodukten. Die Feinfraktion erhöhte die Trockenmasseerträge bei Hafer in der niedrigen und bei Rübsen in der dritten Aufwandmenge. Davon abgesehen wurde der Ertrag bei Hafer durch keine Behandlung oder Aufwandmenge beeinflusst. Bei Rübsen waren die Erträge der mit Grobfraktion und Agglomeraten gedüngten Pflanzen in den beiden höchsten Aufwandmengen signifikant geringer als die der Kontrolle.

Im Versuch mit Hafer wurden Aufgang, Wuchshöhe und Ertrag durch die Gärprodukte signifikant beeinflusst, Wuchshöhe und Ertrag zudem durch die Aufwandmenge (Tabelle A 3). Wechselwirkungen zwischen den beiden Haupteffekten traten nicht auf. Bei Rübsen wurden alle Parameter durch Gärprodukt und Aufwandmenge beeinflusst, wobei es bei Wuchshöhe und Ertrag zu Wechselwirkungen zwischen den beiden Haupteffekten kam.

Nach den ersten drei Versuchen kann zusammenfassend festgestellt werden, dass die Gärprodukte der Kategorie 1 (ohne Zuschlagstoffe) die Wuchshöhe und den Ertrag kaum beeinflussten. Nur im dritten Versuch wurde der Ertrag von Rübsen z.T. durch die Gärprodukte in der höchsten Aufwandmenge gegenüber der Kontrolle signifikant verringert. Im gleichen Versuch wurde auch der Aufgang von Rübsen zum Teil beeinträchtigt. Dies deutet auf phytotoxische Substanzen in dieser Charge der Gärprodukte hin. Die Wirkung war allerdings scheinbar dosisunabhängig bei Feinfraktion (10 bzw. 20 t ha<sup>-1</sup> TM) und Agglomeraten (25 t ha<sup>-1</sup> TM) zu beobachten. Toxische Substanzen treten in Kompostmaterialien häufig punktuell auf, wenn sie z.B. durch Störstoffe aus Batterien oder Flaschendeckeln eingetragen werden. Eine solche punktuelle Verunreinigung ist eine mögliche Erklärung für die hier beobachteten Effekte.



Tabelle 23: Aufgang, Wuchshöhe und Biomasseertrag im phytotoxikologischen Test mit Gärprodukten der Kategorie 1 (Lieferung **Oktober 2015**). Daten sind dargestellt als Mittelwerte  $\pm$  SD. Unterschiedliche Buchstaben innerhalb einer Spalte markieren signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen für diese Aufwandmenge für den jeweiligen Parameter (Tukey's HSD Test bzw. Games-Howell's Test (grau unterlegte Zellen),  $P \leq 0.05$ ). *Zellen in Kursiv: Daten wurden nicht in die statistische Auswertung einbezogen.*

| Pflanzenart   |              | Rübsen                       |                              |                               |                               |                              | Hafer                         |                              |                              |                              |                              |
|---|--------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Aufwandmenge<br>(t ha <sup>-1</sup> TM bzw.<br>für KAS kg ha <sup>-1</sup> N) |              | 5 bzw.<br>100                | 10 bzw.<br>200               | 15 bzw.<br>400                | 20 bzw.<br>600                | 25 bzw.<br>900               | 5 bzw.<br>100                 | 10 bzw.<br>200               | 15 bzw.<br>400               | 20 bzw.<br>600               | 25 bzw.<br>900               |
| Aufgang<br>(% der Kontrolle)  | Kontrolle    | 100 $\pm$ 14 <sup>a</sup>    | 100 $\pm$ 14 <sup>a</sup>    | 100 $\pm$ 14 <sup>a</sup>     | 100 $\pm$ 14 <sup>b</sup>     | 100 $\pm$ 14 <sup>b</sup>    | 100 $\pm$ 9 <sup>a</sup>      | 100 $\pm$ 9 <sup>a</sup>     | 100 $\pm$ 9 <sup>a</sup>     | 100 $\pm$ 9 <sup>a</sup>     | 100 $\pm$ 9 <sup>a</sup>     |
|   | Feinfraktion | 84 $\pm$ 17 <sup>a</sup>     | 69 $\pm$ 11 <sup>a</sup>     | 87 $\pm$ 26 <sup>a</sup>      | 69 $\pm$ 6 <sup>a</sup>       | 87 $\pm$ 15 <sup>ab</sup>    | 94 $\pm$ 17 <sup>a</sup>      | 106 $\pm$ 10 <sup>a</sup>    | 94 $\pm$ 14 <sup>a</sup>     | 100 $\pm$ 12 <sup>a</sup>    | 91 $\pm$ 11 <sup>a</sup>     |
|   | Agglomerate  | 104 $\pm$ 15 <sup>a</sup>    | 99 $\pm$ 20 <sup>a</sup>     | 107 $\pm$ 17 <sup>a</sup>     | 90 $\pm$ 12 <sup>ab</sup>     | 69 $\pm$ 11 <sup>a</sup>     | 112 $\pm$ 7 <sup>a</sup>      | 109 $\pm$ 11 <sup>a</sup>    | 106 $\pm$ 0 <sup>a</sup>     | 103 $\pm$ 15 <sup>a</sup>    | 109 $\pm$ 11 <sup>a</sup>    |
|   | Pellets      | 99 $\pm$ 18 <sup>a</sup>     | 81 $\pm$ 20 <sup>a</sup>     | 87 $\pm$ 11 <sup>a</sup>      | 93 $\pm$ 6 <sup>b</sup>       | 81 $\pm$ 33 <sup>ab</sup>    | 106 $\pm$ 10 <sup>a</sup>     | 103 $\pm$ 11 <sup>a</sup>    | 100 $\pm$ 7 <sup>a</sup>     | 100 $\pm$ 7 <sup>a</sup>     | 97 $\pm$ 26 <sup>a</sup>     |
|   | Grobfraktion | 93 $\pm$ 25 <sup>a</sup>     | 99 $\pm$ 11 <sup>a</sup>     | 104 $\pm$ 15 <sup>a</sup>     | 93 $\pm$ 11 <sup>b</sup>      | 101 $\pm$ 21 <sup>ab</sup>   | 100 $\pm$ 15 <sup>a</sup>     | 100 $\pm$ 7 <sup>a</sup>     | 112 $\pm$ 7 <sup>a</sup>     | 115 $\pm$ 6 <sup>a</sup>     | 97 $\pm$ 11 <sup>a</sup>     |
|   | KAS          | 93 $\pm$ 20                  | 113 $\pm$ 7                  | 104 $\pm$ 6                   | 104 $\pm$ 11                  | 51 $\pm$ 25                  | 106 $\pm$ 17                  | 112 $\pm$ 7                  | 82 $\pm$ 25                  | 109 $\pm$ 6                  | 68 $\pm$ 31                  |
| Wuchshöhe<br>(cm)   | Kontrolle    | 6 $\pm$ 0 <sup>ab</sup>      | 6 $\pm$ 0 <sup>ab</sup>      | 6 $\pm$ 0 <sup>ab</sup>       | 6 $\pm$ 0 <sup>a</sup>        | 6 $\pm$ 0 <sup>a</sup>       | 29 $\pm$ 1 <sup>ab</sup>      | 29 $\pm$ 1 <sup>a</sup>      | 29 $\pm$ 1 <sup>a</sup>      | 29 $\pm$ 1 <sup>a</sup>      | 29 $\pm$ 1 <sup>a</sup>      |
|   | Feinfraktion | 7 $\pm$ 1 <sup>b</sup>       | 6 $\pm$ 1 <sup>a</sup>       | 6 $\pm$ 1 <sup>ab</sup>       | 6 $\pm$ 0 <sup>a</sup>        | 6 $\pm$ 1 <sup>a</sup>       | 31 $\pm$ 3 <sup>b</sup>       | 31 $\pm$ 2 <sup>a</sup>      | 30 $\pm$ 3 <sup>a</sup>      | 29 $\pm$ 2 <sup>a</sup>      | 29 $\pm$ 3 <sup>a</sup>      |
|   | Agglomerate  | 5 $\pm$ 0 <sup>a</sup>       | 6 $\pm$ 1 <sup>a</sup>       | 6 $\pm$ 1 <sup>ab</sup>       | 5 $\pm$ 1 <sup>a</sup>        | 5 $\pm$ 1 <sup>a</sup>       | 29 $\pm$ 1 <sup>ab</sup>      | 30 $\pm$ 2 <sup>a</sup>      | 30 $\pm$ 2 <sup>a</sup>      | 28 $\pm$ 2 <sup>a</sup>      | 29 $\pm$ 3 <sup>a</sup>      |
|   | Pellets      | 6 $\pm$ 1 <sup>ab</sup>      | 6 $\pm$ 1 <sup>ab</sup>      | 5 $\pm$ 0 <sup>a</sup>        | 6 $\pm$ 1 <sup>a</sup>        | 4 $\pm$ 1 <sup>a</sup>       | 30 $\pm$ 1 <sup>ab</sup>      | 30 $\pm$ 2 <sup>a</sup>      | 29 $\pm$ 4 <sup>a</sup>      | 28 $\pm$ 3 <sup>a</sup>      | 27 $\pm$ 1 <sup>a</sup>      |
|   | Grobfraktion | 5 $\pm$ 1 <sup>ab</sup>      | 7 $\pm$ 1 <sup>b</sup>       | 7 $\pm$ 1 <sup>b</sup>        | 5 $\pm$ 1 <sup>a</sup>        | 6 $\pm$ 2 <sup>a</sup>       | 27 $\pm$ 1 <sup>a</sup>       | 29 $\pm$ 2 <sup>a</sup>      | 27 $\pm$ 1 <sup>a</sup>      | 27 $\pm$ 3 <sup>a</sup>      | 24 $\pm$ 3 <sup>a</sup>      |
|   | KAS          | 13 $\pm$ 1                   | 12 $\pm$ 1                   | 12 $\pm$ 1                    | 8 $\pm$ 1                     | 4 $\pm$ 0                    | 38 $\pm$ 4                    | 39 $\pm$ 1                   | 33 $\pm$ 3                   | 35 $\pm$ 1                   | 31 $\pm$ 4                   |
| Ertrag<br>(g je Gefäß TM)   | Kontrolle    | 0,14 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup> | 0,14 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup> | 0,14 $\pm$ 0,02 <sup>ab</sup> | 0,14 $\pm$ 0,02 <sup>b</sup>  | 0,14 $\pm$ 0,02 <sup>b</sup> | 0,21 $\pm$ 0,04 <sup>a</sup>  | 0,21 $\pm$ 0,04 <sup>a</sup> | 0,21 $\pm$ 0,04 <sup>a</sup> | 0,21 $\pm$ 0,04 <sup>a</sup> | 0,21 $\pm$ 0,04 <sup>a</sup> |
|   | Feinfraktion | 0,15 $\pm$ 0,03 <sup>a</sup> | 0,11 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup> | 0,15 $\pm$ 0,04 <sup>b</sup>  | 0,11 $\pm$ 0,03 <sup>ab</sup> | 0,11 $\pm$ 0,03 <sup>b</sup> | 0,27 $\pm$ 0,01 <sup>b</sup>  | 0,21 $\pm$ 0,03 <sup>a</sup> | 0,23 $\pm$ 0,05 <sup>a</sup> | 0,21 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup> | 0,24 $\pm$ 0,07 <sup>a</sup> |
|   | Agglomerate  | 0,14 $\pm$ 0,03 <sup>a</sup> | 0,11 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup> | 0,10 $\pm$ 0,04 <sup>ab</sup> | 0,08 $\pm$ 0,04 <sup>a</sup>  | 0,06 $\pm$ 0,01 <sup>a</sup> | 0,23 $\pm$ 0,02 <sup>ab</sup> | 0,24 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup> | 0,26 $\pm$ 0,06 <sup>a</sup> | 0,19 $\pm$ 0,03 <sup>a</sup> | 0,25 $\pm$ 0,04 <sup>a</sup> |
|   | Pellets      | 0,13 $\pm$ 0,03 <sup>a</sup> | 0,11 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup> | 0,08 $\pm$ 0,04 <sup>a</sup>  | 0,10 $\pm$ 0,02 <sup>ab</sup> | 0,06 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup> | 0,24 $\pm$ 0,03 <sup>ab</sup> | 0,25 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup> | 0,26 $\pm$ 0,10 <sup>a</sup> | 0,21 $\pm$ 0,03 <sup>a</sup> | 0,21 $\pm$ 0,05 <sup>a</sup> |
|   | Grobfraktion | 0,10 $\pm$ 0,01 <sup>a</sup> | 0,13 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup> | 0,13 $\pm$ 0,04 <sup>ab</sup> | 0,09 $\pm$ 0,01 <sup>a</sup>  | 0,11 $\pm$ 0,02 <sup>b</sup> | 0,21 $\pm$ 0,03 <sup>ab</sup> | 0,21 $\pm$ 0,01 <sup>a</sup> | 0,21 $\pm$ 0,01 <sup>a</sup> | 0,21 $\pm$ 0,03 <sup>a</sup> | 0,17 $\pm$ 0,05 <sup>a</sup> |
|   | KAS          | 0,61 $\pm$ 0,10              | 0,60 $\pm$ 0,30              | 0,61 $\pm$ 0,1                | 0,30 $\pm$ 0,10               | 0,08 $\pm$ 0,03              | 0,34 $\pm$ 0,09               | 0,44 $\pm$ 0,06              | 0,27 $\pm$ 0,07              | 0,34 $\pm$ 0,02              | 0,21 $\pm$ 0,12              |

Neben den Gärprodukten wurde zum Vergleich auch Kalkammonsalpeter untersucht. Hier traten in allen Versuchen Ertragssteigerungen bis zu einer Aufwandmenge von 400 bzw. 600 kg ha<sup>-1</sup> N auf. Bei höheren Aufwandmengen von KAS war in den ersten beiden Versuchen eine Ertragsdepression und im letzten Versuch zumindest kein positiver Effekt im Vergleich zur Kontrolle zu beobachten. Der Aufgang wurde bei Hafer nicht, bei Rübsen zum Teil in den höheren Aufwandmengen beeinträchtigt. Die negativen Auswirkungen zu hoher KAS-Mengen sind vor allem auf die hohen Konzentrationen an Ammonium zurückzuführen, welche Wurzeln schädigen und Blattnekrosen hervorrufen können (Bremner, 1990; Hauck und Stephenson, 1965; Wong, 1985; Wang, 1991). Als Ursachen für die Pflanzenschädigung werden u.a. Störungen des Hormongleichgewichts und der Photosynthese, Schädigungen der Chloroplastenstruktur und Veränderungen des interzellulären pH-Werts diskutiert (Bittsánszky *et al.*, 2015). In den hier beschriebenen Versuchen traten die Schädigungen durch KAS erst bei Aufwandmengen auf, die bei Einhaltung der guten fachlichen Praxis auf Ackerflächen nicht vorkommen.

Das phytotoxische Potential von KAS zeigte sich auch im vierten Versuch mit ausgewählten Produkten der Kategorie 2. Hier traten vor allem durch die Agglomerate, die zusätzlich KAS enthielten, deutliche phytotoxische Effekte auf (Tabelle 24). Bei Hafer ebenso wie bei Rübsen wurde der Aufgang durch die Agglomerate mit KAS ab der dritthöchsten Aufwandmenge deutlich reduziert. Bei Rübsen führten auch die Agglomerate mit KAS und zusätzlichem Ton zu signifikant geringerem Aufgang, wobei in den höchsten Aufwandmengen nur noch 3 % der Kontrolle erreicht wurden. Durch reinen KAS wurde bei Rübsen der Aufgang in den beiden höchsten Aufwandmengen signifikant reduziert. Der Aufgang von Hafer war in beiden Varianten davon nicht beeinflusst. Die Agglomerate mit Tiermehl schränkten den Aufgang nur bei Rübsen in der höchsten Aufwandmenge ein, bei Hafer gar nicht. Auch die Agglomerate mit Tiermehl und Ton beeinflussten den Aufgang nicht. Nach 21 Tagen waren bei Rübsen in den mit AggloGr+KAS+Ton behandelten Gefäßen ab einer Aufwandmenge von 600 kg ha<sup>-1</sup> N keine und in den Varianten mit AggloGr+KAS nur noch einzelne Pflanzen vorhanden. Eine Varianzanalyse war deshalb nur bis zur dritten Aufwandmenge möglich. In den ersten beiden Aufwandmengen waren die Pflanzen in den mit Gärprodukten behandelten Gefäßen signifikant größer als in der Kontrolle und genauso groß wie die mit KAS gedüngten Varianten. In der Aufwandmenge 400 kg ha<sup>-1</sup> N galt dies nur noch für die mit AggloGr+KAS+Ton gedüngten Pflanzen. Hafer reagierte weniger stark als Rübsen, zeigte aber in den ersten beiden Aufwandmengen ebenfalls eine größere Wuchshöhe in den Varianten mit AggloGr+KAS verglichen mit der Kontrolle. Ab einer Aufwandmenge von 400 kg ha<sup>-1</sup> N kehrte sich dieses Verhältnis um (Abbildung 13). In den Varianten mit zusätzlichem Ton war dieser Effekt bei Hafer nicht zu beobachten. Der Ertrag wurde bei Rübsen bei den ersten beiden Aufwandmengen durch alle Düngervarianten außer AggloGr+KAS gegenüber der Kontrolle erhöht. Ab der dritten Aufwandmenge waren keine Unterschiede mehr zwischen den Behandlungen nachweisbar. In den hohen Aufwandmengen reduzierte die reine KAS-Düngung den Ertrag gegenüber der Kontrolle deutlich. Bei Hafer waren bei 200 kg ha<sup>-1</sup> N Mehrerträge in den mit KAS und AggloGr+TM+Ton gedüngten Varianten zu beobachten. Ab der vierten Aufwandmenge war der Ertrag in den mit AggloGr+KAS

Tabelle 24: Aufgang, Wuchshöhe und Biomasseertrag im phytotoxikologischen Test mit ausgewählten **Gärprodukten der Kategorie 2**. Daten sind dargestellt als Mittelwerte  $\pm$  SD (Werte ohne SD: Nur in einem Gefäß überlebende Pflanzen, deswegen keine Wiederholungen; Zellen ohne Werte: keine überlebende Pflanzen in den vier Gefäßen dieser Variante). Unterschiedliche Buchstaben innerhalb einer Spalte markieren signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen für diese Aufwandmenge für den jeweiligen Parameter (Tukey's HSD Test bzw. Games-Howell's Test (grau unterlegte Zellen),  $P \leq 0.05$ ). Zellen ohne Buchstaben: Varianzanalyse aufgrund fehlender Werte nicht möglich.

| Pflanzenart                             |                 | Rübsen                        |                               |                              |                           |                           | Hafer                        |                               |                              |                               |                                |
|---|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Aufwandmenge<br>(kg ha <sup>-1</sup> N) |                 | 100                           | 200                           | 400                          | 600                       | 900                       | 100                          | 200                           | 400                          | 600                           | 900                            |
| Aufgang<br>(% der Kontrolle)            | Kontrolle       | 100 $\pm$ 14 <sup>b</sup>     | 100 $\pm$ 14 <sup>b</sup>     | 100 $\pm$ 14 <sup>c</sup>    | 100 $\pm$ 14 <sup>b</sup> | 100 $\pm$ 14 <sup>d</sup> | 100 $\pm$ 9 <sup>a</sup>     | 100 $\pm$ 9 <sup>a</sup>      | 100 $\pm$ 9 <sup>b</sup>     | 100 $\pm$ 9 <sup>b</sup>      | 100 $\pm$ 9 <sup>b</sup>       |
|   | AggloGr+TM      | 89 $\pm$ 18 <sup>ab</sup>     | 77 $\pm$ 29 <sup>ab</sup>     | 89 $\pm$ 31 <sup>bc</sup>    | 83 $\pm$ 15 <sup>b</sup>  | 62 $\pm$ 27 <sup>bc</sup> | 90 $\pm$ 16 <sup>a</sup>     | 99 $\pm$ 11 <sup>a</sup>      | 87 $\pm$ 14 <sup>b</sup>     | 82 $\pm$ 19 <sup>b</sup>      | 82 $\pm$ 19 <sup>b</sup>       |
|   | AggloGr+TM+Ton  | 86 $\pm$ 0 <sup>ab</sup>      | 95 $\pm$ 21 <sup>ab</sup>     | 86 $\pm$ 27 <sup>bc</sup>    | 71 $\pm$ 25 <sup>b</sup>  | 74 $\pm$ 20 <sup>cd</sup> | 101 $\pm$ 9 <sup>a</sup>     | 101 $\pm$ 9 <sup>a</sup>      | 90 $\pm$ 9 <sup>b</sup>      | 93 $\pm$ 19 <sup>b</sup>      | 93 $\pm$ 14 <sup>b</sup>       |
|   | AggloGr+KAS     | 83 $\pm$ 6 <sup>ab</sup>      | 65 $\pm$ 18 <sup>ab</sup>     | 43 $\pm$ 29 <sup>ab</sup>    | 15 $\pm$ 31 <sup>a</sup>  | 6 $\pm$ 12 <sup>a</sup>   | 96 $\pm$ 15 <sup>a</sup>     | 85 $\pm$ 15 <sup>a</sup>      | 51 $\pm$ 20 <sup>a</sup>     | 42 $\pm$ 31 <sup>a</sup>      | 23 $\pm$ 21 <sup>a</sup>       |
|   | AggloGr+KAS+Ton | 52 $\pm$ 15 <sup>a</sup>      | 62 $\pm$ 0 <sup>a</sup>       | 22 $\pm$ 35 <sup>a</sup>     | 3 $\pm$ 6 <sup>a</sup>    | 3 $\pm$ 6 <sup>a</sup>    | 87 $\pm$ 6 <sup>a</sup>      | 85 $\pm$ 7 <sup>a</sup>       | 76 $\pm$ 11 <sup>ab</sup>    | 76 $\pm$ 6 <sup>ab</sup>      | 59 $\pm$ 40 <sup>ab</sup>      |
|   | KAS             | 83 $\pm$ 18 <sup>ab</sup>     | 86 $\pm$ 77 <sup>ab</sup>     | 71 $\pm$ 32 <sup>abc</sup>   | 15 $\pm$ 12 <sup>a</sup>  | 28 $\pm$ 18 <sup>ab</sup> | 90 $\pm$ 9 <sup>a</sup>      | 101 $\pm$ 0 <sup>a</sup>      | 101 $\pm$ 13 <sup>b</sup>    | 87 $\pm$ 23 <sup>b</sup>      | 68 $\pm$ 33 <sup>ab</sup>      |
| Wuchshöhe<br>(cm)                       | Kontrolle       | 6 $\pm$ 1 <sup>a</sup>        | 6 $\pm$ 1 <sup>a</sup>        | 6 $\pm$ 1 <sup>a</sup>       | 6 $\pm$ 1                 | 6 $\pm$ 1                 | 36 $\pm$ 2 <sup>a</sup>      | 36 $\pm$ 2 <sup>a</sup>       | 36 $\pm$ 2 <sup>ab</sup>     | 36 $\pm$ 2 <sup>bc</sup>      | 36 $\pm$ 2 <sup>b</sup>        |
|   | AggloGr+TM      | 12 $\pm$ 1 <sup>bc</sup>      | 13 $\pm$ 2 <sup>b</sup>       | 11 $\pm$ 3 <sup>ab</sup>     | 7 $\pm$ 4                 | -                         | 40 $\pm$ 3 <sup>ab</sup>     | 46 $\pm$ 2 <sup>c</sup>       | 42 $\pm$ 6 <sup>b</sup>      | 40 $\pm$ 1 <sup>c</sup>       | 22 $\pm$ 8 <sup>a</sup>        |
|   | AggloGr+TM+Ton  | 9 $\pm$ 1 <sup>b</sup>        | 13 $\pm$ 1 <sup>b</sup>       | 10 $\pm$ 3 <sup>ab</sup>     | 6 $\pm$ 0                 | 3 $\pm$ 0                 | 37 $\pm$ 4 <sup>ab</sup>     | 44 $\pm$ 1 <sup>bc</sup>      | 39 $\pm$ 4 <sup>ab</sup>     | 35 $\pm$ 4 <sup>bc</sup>      | 28 $\pm$ 5 <sup>ab</sup>       |
|   | AggloGr+KAS     | 12 $\pm$ 2 <sup>bc</sup>      | 12 $\pm$ 2 <sup>b</sup>       | 4                            | 4                         | -                         | 42 $\pm$ 4 <sup>b</sup>      | 42 $\pm$ 4 <sup>bc</sup>      | 33 $\pm$ 6 <sup>a</sup>      | 26 $\pm$ 5 <sup>a</sup>       | 16 $\pm$ 6 <sup>a</sup>        |
|   | AggloGr+KAS+Ton | 14 $\pm$ 3 <sup>bc</sup>      | 12 $\pm$ 1 <sup>b</sup>       | 11 $\pm$ 2 <sup>b</sup>      | -                         | -                         | 40 $\pm$ 2 <sup>ab</sup>     | 39 $\pm$ 3 <sup>ab</sup>      | 35 $\pm$ 5 <sup>ab</sup>     | 31 $\pm$ 5 <sup>ab</sup>      | 26 $\pm$ 4 <sup>ab</sup>       |
|   | KAS             | 13 $\pm$ 1 <sup>c</sup>       | 13 $\pm$ 2 <sup>b</sup>       | 9 $\pm$ 2 <sup>ab</sup>      | 5 $\pm$ 2                 | 5 $\pm$ 1                 | 42 $\pm$ 3 <sup>b</sup>      | 39 $\pm$ 2 <sup>ab</sup>      | 38 $\pm$ 2 <sup>ab</sup>     | 35 $\pm$ 6 <sup>bc</sup>      | 27 $\pm$ 9 <sup>ab</sup>       |
| Ertrag<br>(g je Gefäß TM)               | Kontrolle       | 0,31 $\pm$ 0,08 <sup>a</sup>  | 0,31 $\pm$ 0,08 <sup>a</sup>  | 0,31 $\pm$ 0,08 <sup>a</sup> | 0,31 $\pm$ 0,08           | 0,31 $\pm$ 0,08           | 0,38 $\pm$ 0,06 <sup>a</sup> | 0,38 $\pm$ 0,06 <sup>a</sup>  | 0,38 $\pm$ 0,06 <sup>a</sup> | 0,38 $\pm$ 0,06 <sup>b</sup>  | 0,38 $\pm$ 0,06 <sup>c</sup>   |
|   | AggloGr+TM      | 0,73 $\pm$ 0,20 <sup>bc</sup> | 0,64 $\pm$ 0,04 <sup>b</sup>  | 0,44 $\pm$ 0,26 <sup>a</sup> | 0,13 $\pm$ 0,08           | -                         | 0,37 $\pm$ 0,03 <sup>a</sup> | 0,50 $\pm$ 0,08 <sup>ab</sup> | 0,46 $\pm$ 0,09 <sup>a</sup> | 0,39 $\pm$ 0,05 <sup>b</sup>  | 0,17 $\pm$ 0,09 <sup>ab</sup>  |
|   | AggloGr+TM+Ton  | 0,55 $\pm$ 0,14 <sup>ab</sup> | 0,72 $\pm$ 0,16 <sup>b</sup>  | 0,50 $\pm$ 0,25 <sup>a</sup> | 0,11 $\pm$ 0,05           | 0,02 $\pm$ 0,01           | 0,36 $\pm$ 0,04 <sup>a</sup> | 0,50 $\pm$ 0,02 <sup>b</sup>  | 0,44 $\pm$ 0,07 <sup>a</sup> | 0,34 $\pm$ 0,07 <sup>b</sup>  | 0,22 $\pm$ 0,07 <sup>abc</sup> |
|   | AggloGr+KAS     | 0,73 $\pm$ 0,09 <sup>bc</sup> | 0,65 $\pm$ 0,29 <sup>ab</sup> | 0,35                         | 0,13                      | -                         | 0,44 $\pm$ 0,07 <sup>a</sup> | 0,44 $\pm$ 0,14 <sup>ab</sup> | 0,28 $\pm$ 0,13 <sup>a</sup> | 0,14 $\pm$ 0,08 <sup>a</sup>  | 0,05 $\pm$ 0,06 <sup>a</sup>   |
|   | AggloGr+KAS+Ton | 0,67 $\pm$ 0,23 <sup>bc</sup> | 0,94 $\pm$ 0,16 <sup>b</sup>  | 0,51 $\pm$ 0,54 <sup>a</sup> | -                         | -                         | 0,39 $\pm$ 0,07 <sup>a</sup> | 0,39 $\pm$ 0,08 <sup>ab</sup> | 0,35 $\pm$ 0,11 <sup>a</sup> | 0,28 $\pm$ 0,07 <sup>ab</sup> | 0,17 $\pm$ 0,12 <sup>ab</sup>  |
|   | KAS             | 0,88 $\pm$ 0,11 <sup>c</sup>  | 0,80 $\pm$ 0,17 <sup>b</sup>  | 0,47 $\pm$ 0,25 <sup>a</sup> | 0,07 $\pm$ 0,04           | 0,08 $\pm$ 0,08           | 0,47 $\pm$ 0,07 <sup>a</sup> | 0,48 $\pm$ 0,03 <sup>b</sup>  | 0,45 $\pm$ 0,07 <sup>a</sup> | 0,31 $\pm$ 0,08 <sup>b</sup>  | 0,28 $\pm$ 0,14 <sup>bc</sup>  |

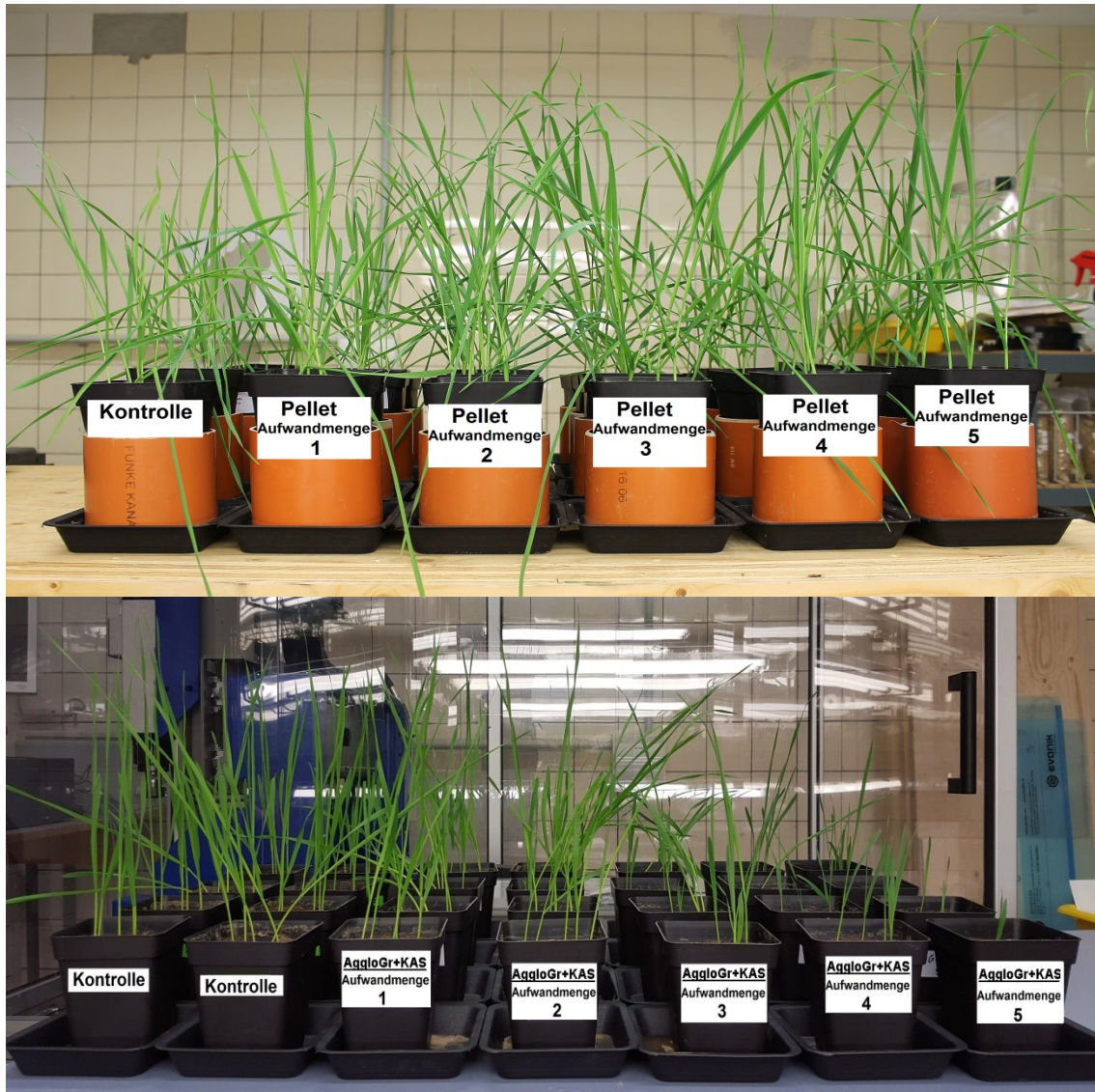


Abbildung 13: Vergleich von Hafer im Phytotoxizitätstest mit Pellets (oben) und Agglomeraten der Kategorie 2 (unten). Produktmenge je Gefäß aufsteigend von links (entsprechend  $0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ ) nach rechts (entsprechend  $900 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ )

behandelten Gefäßen signifikant geringer als in der Kontrolle. In der höchsten Aufwandmenge galt dies zusätzlich auch für die Varianten AggloGr+TM und AggloGr+KAS+Ton.

Die mit KAS gedüngten Pflanzen zeigten in diesem Versuch bei Hafer auch in den hohen Aufwandmengen keine statistisch signifikante Ertragsreduktion gegenüber der Kontrolle. Die Unterschiede zwischen den KAS-Wiederholungen waren jedoch sehr groß, was auf eine Einschränkung des Pflanzenwachstums zumindest in einigen Gefäßen hindeutet. Bei Hafer wurden beide Haupteffekte für alle Parameter signifikant wirksam. Auch eine signifikante Wechselwirkung zwischen Düngeprodukt und Aufwandmenge wurde nachgewiesen (Tabelle A 3). Bei Rüben wurde der Ausgang durch die Haupteffekte und die Wechselwirkung beeinflusst, die Wuchshöhe nur durch die Aufwandmenge und durch Wechselwirkungen zwischen den Haupteffekten und der Ertrag nur durch die Aufwandmenge.

Die Beimengung von Ton reduzierte teilweise die phytotoxische Wirkung des KAS. Die Bindung von Ammoniumionen an Ton- und Humuspartikel ist in Böden ein bekanntes Phänomen (Lange,

1985; Kuntze, 1994). Durch die Zugabe von Tonmineralien wurde in den Produkten der Kategorie 2 Ammonium gebunden und dessen schädliche Wirkung eingedämmt. Diese Wirkung war jedoch nur bei Hafer zu beobachten, nicht bei dem in allen Versuchen empfindlicher reagierenden Rübsen. In den Tiermehl-Produkten war mit ca.  $3 \text{ g kg}^{-1}$  deutlich weniger Ammonium enthalten als in den KAS-Produkten, allerdings immer noch zwei- bis dreimal so viel wie in den Gärprodukten der Kategorie 1. Phytotoxische Effekte waren deshalb auch hier bei beiden Pflanzenarten zu verzeichnen, fielen aber deutlich geringer aus als bei den Produkten mit KAS.

In allen Versuchen erwies sich die Platzierung der Produkte als problematisch. Um die durch die Aufbereitung entstehenden Unterschiede zwischen den Produkten zu erhalten, wurden Pellets und Agglomerate nicht zerkleinert. In den hohen Aufwandmengen führte dies jedoch dazu, dass große Einzelstücke nahe zur Bodenoberfläche bzw. zu den Samen abgelegt werden mussten. In Einzelfällen können hierdurch physische Barrieren oder punktuell hohe Konzentrationen an Nähr- oder Schadelementen in unmittelbarer Nähe zu den Keimpflanzen entstanden sein, welche die Entwicklung der Jungpflanzen unverhältnismäßig stark beeinflusst haben könnten. Die hohe Streuung in einigen Behandlungen ist dadurch und durch die für Bioabfälle typische Inhomogenität zu erklären.

#### 3.4.4 Schlussfolgerungen

Zusammenfassend lassen sich aus den phytotoxikologischen Tests folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Kompostierte Gärprodukte aus Bioabfällen weisen in der Regel eine geringe Phytotoxizität auf. In Einzelfällen wurde sie jedoch im Rahmen dieser Versuche beobachtet. Eine Beeinflussung der phytotoxischen Wirkung durch die Aufbereitungsform konnte nicht nachgewiesen werden. Die negativen Effekte waren in diesen Versuchen nicht von der Gesamtaufwandmenge abhängig, sondern wurden durch punktuelle Verunreinigungen verursacht. Obergrenzen für einzelne Schadstoffe wären somit sinnvoller als allgemeine Höchstmengen für Bioabfallkomposte.
- Ein positiver Düngeeffekt war durch die Gärprodukte der Kategorie 1 innerhalb der ersten 21 Tage der Pflanzenentwicklung nicht zu beobachten.
- Durch alle Gärprodukte der Kategorie 2, denen KAS oder Tiermehl beigemischt wurde, wurden in den praxisrelevanten Aufwandmengen 100 und  $200 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$  Mehrerträge im Vergleich zur Kontrolle erzielt.
- Potentielle phytotoxische Effekte durch hohe Ammoniumkonzentrationen müssen bei der Aufwertung von kompostierten Gärprodukten durch Stickstoffbeimengung beachtet werden und erfordern Aufmerksamkeit bei der Wahl der stickstoffliefernden Komponente.
- Rübsen erwies sich in allen Versuchen als empfindlicher gegenüber phytotoxischen Effekten als Hafer. Bei der Entwicklung von neuartigen Düngeprodukten und dazugehörigen Anwendungsempfehlungen müssen artspezifische Unterschiede beachtet werden.

### 3.5 Wirkungen der Gärprodukte auf Biomassebildung und bodenchemische Parameter unter kontrollierten Bedingungen

#### 3.5.1 Zielstellung

Verschiedene Untersuchungen haben gezeigt, dass Form und Dauer der Kompostierung und Aufbereitung von Gärresten und kommunalen Abfällen einen erheblichen Einfluss auf deren Pflanzenverträglichkeit und Einsetzbarkeit als Dünger haben (Fuchs *et al.*, 2008; Abdullahi *et al.*, 2008). Mit den phytotoxikologischen Tests wurde die Wirkung der Gärprodukte auf Aufgang und Entwicklung der Jungpflanzen geprüft und die Möglichkeit einer dosisabhängigen Phytotoxizität untersucht. Diese Versuche sind jedoch sehr aufwendig und decken gleichzeitig die Pflanzenentwicklung nur bis zur Bildung der ersten Blätter ab. In Ergänzung dazu wurden deshalb Gefäßversuche im Gewächshaus durchgeführt. Bei diesen musste zwar die Anzahl der zu testenden Aufwandmengen reduziert werden, dafür konnte aber die Wirkung der im Projekt entwickelten Gärprodukte über einen weitaus größeren Abschnitt der Pflanzenentwicklung hinweg untersucht werden. Betrachtet wurden dabei nicht nur phytotoxikologische Effekte, sondern in Ergänzung zum Feldversuch auch die mögliche Düngewirkung der Produkte unter kontrollierten Bedingungen im Gewächshaus.

#### 3.5.2 Material und Methoden

**2015**

##### Versuchsanlage

Der Gefäßversuch 2015 wurde Anfang Februar im Gewächshaus des Fachgebietes Acker- und Pflanzenbau der Lebenswissenschaftlichen Fakultät der Humboldt Universität zu Berlin in Berlin-Dahlem angelegt. Verwendet wurden Mitscherlichgefäße mit einem Fassungsvermögen von 6 kg Boden. In zwei vom Aufbau her identischen zweifaktoriellen Versuchen mit vier Wiederholungen wurden die Faktoren A (Düngeprodukt) und B (Aufwandmenge, bezogen auf den Stickstoffgehalt) getestet. Ein Versuch wurde dabei mit Hafer (*Avena sativa* L., cv. Max, Berthold Bauer/I.G. Pflanzenzucht, Deutschland) durchgeführt, der andere mit Sommerraps (*Brassica napus* L., cv. O-sorno, Lembke KG/Saaten Union, Deutschland).

Pro Gefäß wurden 15 (Hafer) bzw. 7 (Sommerraps) Körner ausgesät. Nach dem Auflaufen wurde auf 10 Hafer- bzw. 3 Rapspflanzen je Gefäß vereinzelt.

Während des Versuches herrschten eine mittlere Temperatur von 21° C und eine mittlere Luftfeuchtigkeit von 41 % bei einer Beleuchtungsdauer von 14 Stunden pro Tag.

##### Gärprodukte und Aufwandmenge

Untersucht wurden die vier Gärprodukte der Kategorie 1 (Lieferung Juni 2014), sowie zum Vergleich ein fester Gärrest aus einer landwirtschaftlichen Biogasanlage mit Separation der festen und flüssigen Phase. Dieser Gärrest stammte aus der Biogasanlage der Havellandhof Ribbeck

GbR, in der unter mesophilen Bedingungen eine Substratmischung aus 30 % Ringergülle, 30 % Maissilage, 30 % Grassilage und 10 % Rindermist vergoren wird. Die Stickstoffgehalte dieses Gärrestes betrugen  $20,5 \text{ g kg}^{-1} \text{ N}_{\text{ges}}$  und  $1,4 \text{ g kg}^{-1} \text{ NH}_4\text{-N}$  und waren somit mit denen der anderen Gärprodukte vergleichbar.

Alle Düngevarianten wurden mit einer Aufwandmenge von ein und drei Gramm Stickstoff je Gefäß (Faktor B) getestet. Zusätzlich wurde eine ungedüngte Kontrolle untersucht (Tabelle 25). Abgesehen von den verschiedenen Gärprodukten wurde keine weitere Düngung vorgenommen. Die Gefäße der Kontrolle verblieben ohne jede Düngung.

Tabelle 25: Prüffaktoren im Gefäßversuch 2015

| <b>Prüffaktor A:</b> | <b>Düngerprodukt</b>   |
|----------------------|--|
|                      | a1 = Feinfraktion<br>a2 = Agglomerate<br>a3 = Pellets<br>a4 = Grobfraktion<br>a5 = Gärrest Ribbeck<br>a6 = Kontrolle |
| <b>Prüffaktor B:</b> | <b>Aufwandmenge</b>  |
|                      | b1 = 1 g Stickstoff<br>b2 = 3 g Stickstoff   |

### Boden

Der für den Versuch eingesetzte Boden (lehmiger Sand) stammt aus der Krume einer Ackerfläche der Lehr- und Forschungsstation der Humboldt-Universität zu Berlin in Berlin-Dahlem ( $52^\circ 28' \text{ N}$ ;  $13^\circ 18' \text{ E}$ ). Die chemischen Eigenschaften des Bodens sind in Tabelle 26 dargestellt.

Tabelle 26: Chemische Eigenschaften des für den Gefäßversuch 2015 verwendeten Bodens

| Parameter | N <sub>ges</sub> | C <sub>ges</sub> | C <sub>org</sub> | C <sub>hwl</sub>   | P <sub>DL</sub>    | K <sub>DL</sub> | pH-Wert |
|-----------|------------------|------------------|------------------|--------------------|--------------------|-----------------|---------|
|           | % TM             |                  |                  | g kg <sup>-1</sup> | g kg <sup>-1</sup> |                 |         |
| Boden     | 0,09             | 1,55             | 1,06             | 0,09               | 0,49               | 0,13            | 6,79    |

### Untersuchungen

Im Gefäßversuch mit Hafer wurden die Entwicklung ausgewählter bodenchemischer Parameter, Aufgang, Entwicklungsverlauf und der N-Versorgungsstatus (Blattfarbe) der Pflanzen ebenso erfasst wie Ertrag und Ertragsstruktur und die Gehalte an ausgewählten Nährstoffen in Stroh und Korn.

Die Entnahme der Bodenproben erfolgte nach der Ernte mit einem Bohrstock, wobei je Variante aus den vier Wiederholungen eine Mischprobe gebildet wurde. Die Proben wurden mit einer Schwingscheibenmühle gemahlen und auf die Gehalte an organischem Kohlenstoff ( $C_{\text{org}}$ ), Gesamtkohlenstoff ( $C_{\text{ges}}$ ), heißwasserlöslichem Kohlenstoff ( $C_{\text{hwl}}$ ) sowie auf den pH-Wert untersucht. Der Gesamtkohlenstoffgehalt wurde durch Elementaranalyse (katalytische Verbrennung) mit Hilfe des CNS VarioMax (Elemental Analysis GmbH, Hanau, Deutschland) nach DIN EN 15936 bestimmt. Der Gehalt an organischem Kohlenstoff ( $C_{\text{org}}$ ) wurde ebenfalls nach DIN EN 15936 entsprechend der Methode der VDLUFA A.4.1.3.2 mit dem Elementaranalysator Vario C



untersucht. Der Gehalt an heißwasserlöslichem Kohlenstoff ( $C_{hwl}$ ) wurde anhand der infrarotspektroskopischen bzw. elektrochemischen Messung nach einer Heißwasserextraktion nach VDLUFA A.4.3.2 ermittelt. Die Messung erfolgte durch liquiToC. Die pH-Wert-Untersuchung ist nach Extraktion mit Calciumchloridlösung gemäß DIN 19684 mit einem pH-Meter ausgeführt worden.

Wachstum und Entwicklungsverlauf wurden dokumentiert, indem wöchentlich das Längenwachstum aller Einzelpflanzen gemessen und das Entwicklungsstadium der einzelnen Gefäße nach BBCH-Skala (Meier, 2001) bestimmt wurden. Die Messung der Wuchshöhe erfolgte, bis keine weitere Veränderung mehr zu verzeichnen war. Die Blattfarbe als Indikator für die Stickstoffversorgung der Pflanzen wurde parallel zu den anderen Bonituren mithilfe des YARA N-Testers (YARA GmbH & Co. KG, Deutschland) bestimmt (Abbildung 14).



Abbildung 14: Messung der Blattfarbe von Raps mit dem YARA-N-Tester [Foto: Roß]

Durch das Gerät werden Blätter mit Licht in zwei Wellenlängenbereichen durchleuchtet, die vom in den Blättern enthaltenen Chlorophyll unterschiedlich stark absorbiert werden. Das Restlicht wird in einer Fotodiode aufgefangen und zu einem dimensionslosen Messwert umgerechnet (YARA, 2016). Je höher dieser Messwert ist, desto höher ist der Stickstoffgehalt in den Blättern. Die Messung der Blattfarbe wurde mit Eintreten der Blattseneszenz abgebrochen.

Nach der Ernte wurden die Frisch- und Trockenmassen der Rapspflanzen sowie des Haferstrohs und der Haferkörner gravimetrisch nach der Methode der VDLUFA ermittelt. Da Wachstum und Entwicklung beim Raps im Jahr 2015 stark eingeschränkt waren (s. Kapitel 3.5.3), wurde zusätzlich zum Biomasseertrag auch die Blattfläche je Gefäß erfasst, um eine weitere Differenzierung zwischen den Behandlungsvarianten zu ermöglichen. Für die Messung wurde das in Abbildung 15 gezeigte Gerät der Firma Bachofer GmbH + Co KG Laboratoriumsgeräte (Reutlingen, Deutschland) verwendet. Pro Gefäß wurden sämtliche Blätter aller drei Pflanzen vom Blattgrund



an (also inklusive Stiel) gemeinsam erfasst. Zum Ausgleich von Messungenauigkeiten wurde die Messung pro Gefäß drei Mal wiederholt und aus den drei Messungen das arithmetische Mittel gebildet.



Abbildung 15: Messgerät für die Bestimmung der Blattfläche (links) mit Anzeige der Messwerte in cm<sup>2</sup> (rechts) [Foto: Herbst/Roß]

Von allen Varianten und Wiederholungen wurde anschließend ein Teil der Biomasse bzw. des Strohs bei 60 °C getrocknet und auf 1 mm gemahlen, um Stickstoff- (N), Phosphor- (P) und Kaliumgehalte (K) zu bestimmen. N wurde mit Hilfe eines Vario MAX CNS Elementaranalysators (Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau, Deutschland) bestimmt. P und K wurden durch Mikrowellenextraktion (Mars 6, CEM, Deutschland) gelöst und mit Hilfe eines ICP-OES (Thermo Scientific, USA) analysiert. Die Körner wurden nach der Bestimmung der Korngrößenverteilung und des Tausendkorngewichts (TKG) ebenfalls vermahlen und die Nährstoffgehalte wie zuvor beschrieben analysiert (N, P, K). Der Rohproteingehalt des Hafers wurde nach Bottebrodt *et al.* (1999) durch die Multiplikation des Stickstoffgehaltes im Korn mit dem Faktor 6,25 ermittelt. Aufgrund der geringen Menge an Pflanzenmaterial pro Gefäß wurden bei Hafer aus allen Proben jeweils Mischproben aus den vier Wiederholungen einer Variante gebildet und in Doppelbestimmung analysiert. Dies wurde aufgrund der hohen Probenanzahl auch für die Bodenproben übernommen. Bei Raps war eine Analyse der Biomasse in jedem Gefäß möglich.

### Statistische Analyse

Die Boniturdaten (jeweils letzter Termin), Ertragsergebnisse und die Ergebnisse der chemischen Analysen wurden mit Hilfe von SPSS Statistics Desktop 20.0 für Windows auf signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen hin untersucht, sofern dies durch eine ausreichende Anzahl an Wiederholungen möglich war. Angewendet wurde eine einfaktorielle ANOVA, gefolgt vom post-hoc Test nach Tukey ( $P \leq 0.05$ ). Die Ergebnisse sind dargestellt als Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichungen.

## **2016**

### Versuchsanlage

Im Gegensatz zum Jahr 2015 handelte es sich im Jahr 2016 um zwei einfaktorielle Versuche, in denen alle Gärprodukte der Kategorie 2 in einer Aufwandmenge getestet wurden. Davon abgesehen waren Aufbau und Bedingungen im Gewächshaus identisch zu 2015. Der Versuch wurde ebenfalls im Februar angelegt.

### Gärprodukte und Aufwandmenge

Getestet wurden alle Gärprodukte der Kategorie 2 sowie zum Vergleich ausgewählte Produkte der Kategorie 1 (Lieferung Oktober 2015) und eine mit Kalkammonsalpeter (KAS) gedüngte Variante. Alle Düngeprodukte wurden in einer Aufwandmenge eingesetzt, die 3 g Stickstoff je Gefäß entsprach. Zusätzlich wurde eine vollständig ungedüngte Kontrolle angelegt. Die Varianten sind in Tabelle 27 dargestellt. Aufgrund zu geringer Produktmengen konnte die Variante AggloGr nur im Versuch mit Hafer getestet werden, während die Erträge der Variante mit Agglomeraten aus dem Jahr 2015 aufgrund von Mäusebefall nur bei Raps ausgewertet werden konnte.

Tabelle 27: Prüfglieder im Gefäßversuch 2016. Hellgrau unterlegte Varianten wurden nur im Versuch mit Hafer getestet, dunkelgrau unterlegte Varianten nur im Versuch mit Raps ausgewertet.

| Variante  | Abkürzung         | Stickstoffmenge<br>(g Gefäß <sup>-1</sup> ) |
|---|-------------------|---|
| Agglomerat aus Bioabfall-Gärrest                            | AggloGr           | 3   |
| Agglomerat aus Bioabfall-Gärrest + Tiermehl                 | AggloGr+TM        | 3   |
| Agglomerat aus Bioabfall-Gärrest + Tiermehl + Ton           | AggloGr+TM+Ton    | 3   |
| Agglomerat aus Bioabfall-Gärrest + Tiermehl + Stroh         | AggloGr+TM+Stroh  | 3   |
| Agglomerat aus Bioabfall-Gärrest + KAS                      | AggloGr+KAS       | 3   |
| Agglomerat aus Bioabfall-Gärrest + KAS + Ton                | AggloGr+KAS+Ton   | 3   |
| Agglomerat aus Bioabfall-Gärrest + KAS + Stroh              | AggloGr+KAS+Stroh | 3   |
| Agglomerate aus Bioabfall-Gärrest<br>Lieferung Oktober 2015 | Agglo2015         | 3   |
| Pellets aus Bioabfall-Gärrest<br>Lieferung Oktober 2015     | Pellet2015        | 3   |
| Kalkammonsalpeter   | KAS               | 3   |
| Kontrolle   | Kontrolle         | 0   |

### Boden

Im Jahr 2016 wurde Boden von der gleichen Ackerfläche verwendet wie im Jahr 2015. Die chemischen Eigenschaften sind in Tabelle 28 dargestellt.

Tabelle 28: Chemische Eigenschaften des für den Gefäßversuch 2016 verwendeten Bodens

| Parameter | N <sub>ges</sub> | C <sub>ges</sub> | C <sub>org</sub> | C <sub>hwl</sub>   | P <sub>DL</sub>    | K <sub>DL</sub> | pH-Wert |
|-----------|------------------|------------------|------------------|--------------------|--------------------|-----------------|---------|
|           | % TM             |                  |                  | g kg <sup>-1</sup> | g kg <sup>-1</sup> |                 |         |
| Boden     | 0,08             | 1,50             | 0,96             | 0,39               | 0,40               | 0,14            | 6,80    |

### Untersuchungen

Die Untersuchungen und Ertragserfassungen wurden 2016 in der gleichen Art und Weise durchgeführt wie 2015. Nur auf die Messung der Blattfläche bei Raps wurde verzichtet, da die übrigen

Ergebnisse in diesem Jahr aussagekräftig genug erschienen und die Messung durch die erzielte Pflanzengröße sehr aufwendig gewesen wäre.

Die Proben von Pflanzenmaterial und Boden wurden 2016 einzeln analysiert, sofern genug Material vorhanden war.

### Statistische Analyse

Die Boniturdaten (jeweils letzter Termin), Ertragsergebnisse und die Ergebnisse der chemischen Analysen wurden mit Hilfe von SPSS Statistics Desktop 20.0 für Windows auf signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen untersucht. Angewendet wurde eine einfaktorielle ANOVA, gefolgt vom post-hoc Test nach Tukey ( $P \leq 0.05$ ). Die Ergebnisse sind dargestellt als Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichungen.

### 3.5.3 Ergebnisse und Diskussion

#### **Hafer 2015**

Im Jahr 2015 wurde die maximale Wuchshöhe bei Hafer 10 bis 12 Wochen nach der Aussaat (BBCH-Stadium 71, Beginn der Kornfüllung) erreicht. Die Aufwandmenge beeinflusste den Entwicklungsverlauf und die Endhöhe der Pflanzen nur unwesentlich. Mit rund 63 cm wuchsen die größten Pflanzen bei beiden Aufwandmengen in den mit Agglomeraten und Feinfraktion gedüngten Gefäßen (Abbildung 16 und Abbildung A 7). Signifikante Unterschiede (einfaktorielle ANOVA,  $p \leq 0,05$ ) zur Kontrolle wurden bei diesen Varianten jedoch nicht festgestellt. Die Anwendung der Grobfraktion führte demgegenüber bei beiden Aufwandmengen zu Pflanzen, die mit rund 54 cm signifikant kleiner waren als in allen anderen Behandlungen inklusive der ungedüngten Kontrolle.

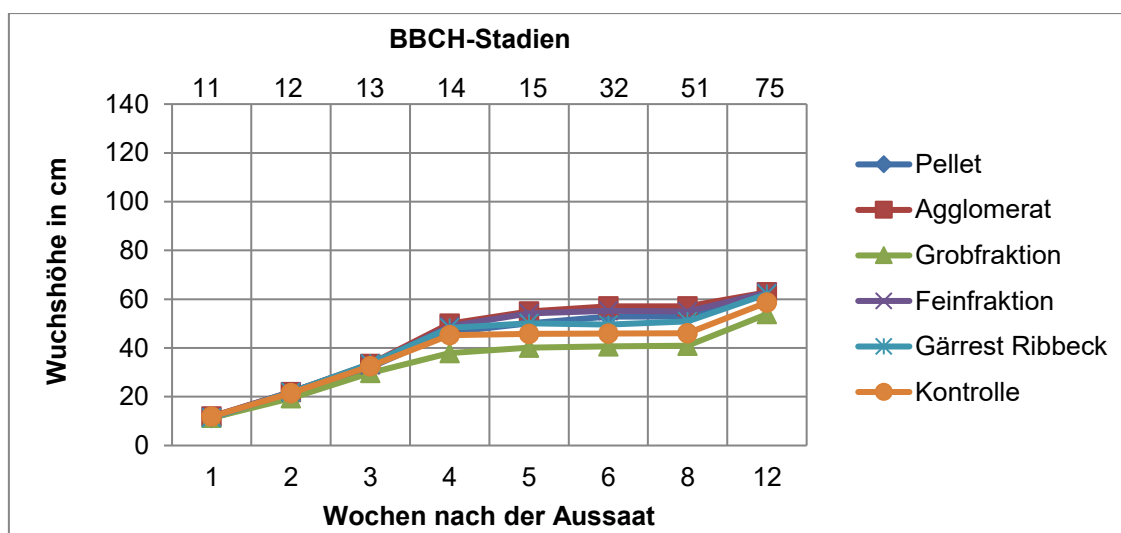


Abbildung 16: Entwicklung der Wuchshöhe bei Hafer im Jahr 2015 in den Varianten mit 3 g Gefäß<sup>-1</sup> N

Die Stickstoffversorgung der mit Grobfraktion behandelten Pflanzen war, wie aus den Blattgrünmessungen abzuleiten, bis zum Beginn der Blüte (BBCH 61) ebenfalls geringer als bei allen anderen mit Gärprodukten gedüngten Pflanzen und in der niedrigen Aufwandmenge auch geringer als die der ungedüngten Kontrollpflanzen (Abbildung 17 und Abbildung 18).

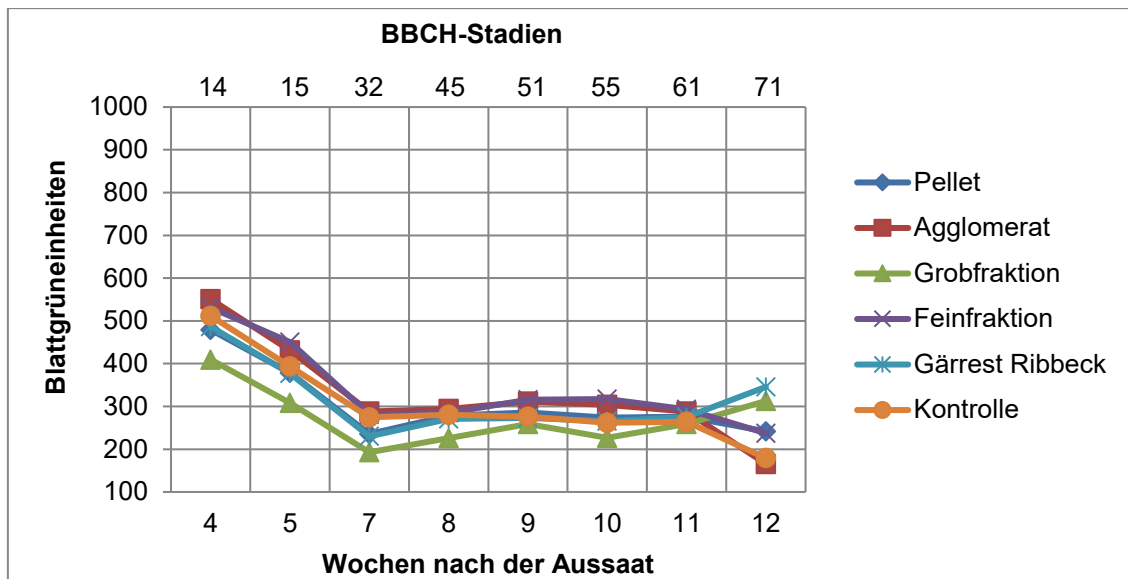


Abbildung 17: Entwicklung des Blattgrüns bei Hafer im Jahr 2015 in den Varianten mit 1 g Gefäß<sup>-1</sup> N

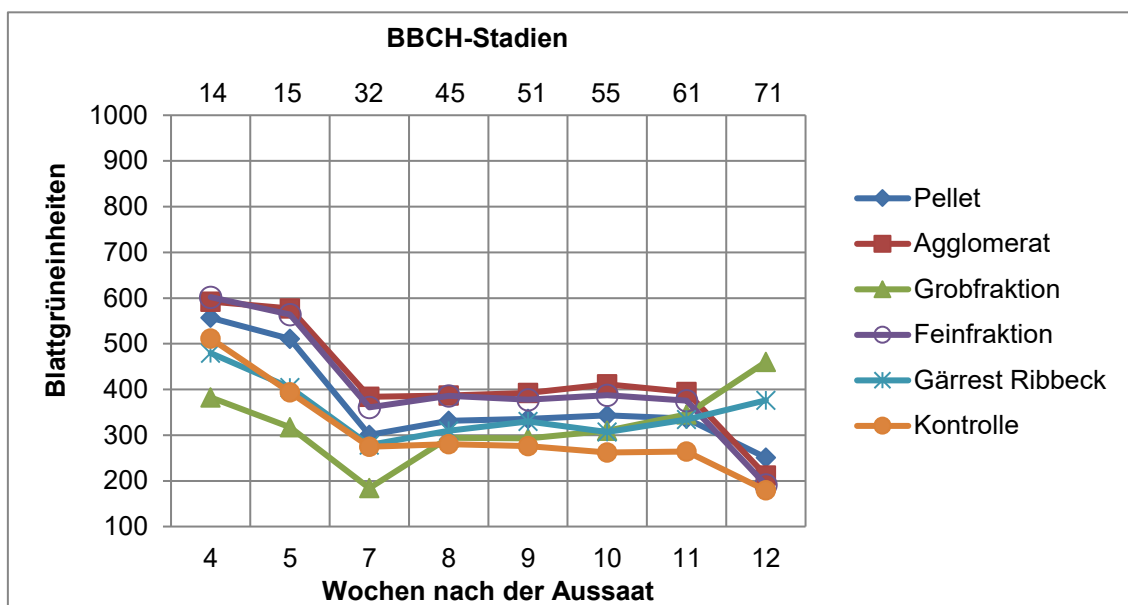


Abbildung 18: Entwicklung des Blattgrüns bei Hafer im Jahr 2015 in den Varianten mit 3 g Gefäß<sup>-1</sup> N

Die höchsten Blattgrün-Messwerte traten bei allen Behandlungen zum ersten Termin (vier Wochen nach der Aussaat) auf. Die höchste Blattgrüneinheit von 602 wurde zu diesem Zeitpunkt in der Düngevariante Feinfraktion mit der hohen Aufwandmenge gemessen. Von da an bis zur siebten Woche nach der Aussaat fielen bei allen Behandlungen die Messwerte ab. 45 Tage nach der Aussaat wurde der Tiefpunkt des Kurvenverlaufes erreicht. Ab Woche 7 bis Woche 11 (Beginn der Blüte) stagnierten die Blattgrün-Messwerte in beiden Aufwandmengen weitgehend. Nur bei den mit Grobfraktion (hohe Aufwandmenge) behandelten Varianten war ein Anstieg bis zur Blüte zu verzeichnen.

Nach dem Ende der Blüte drehten sich die Verhältnisse der Blattgrün-Messwerte vollständig um. Bei einer Aufwandmenge von 1 g N je Gefäß waren am letzten Messtermin (BBCH 71) die mit Gärrest aus Ribbeck versorgten Pflanzen signifikant grüner als alle anderen, gefolgt von den

Pflanzen der Grobfraction. Die ungedüngten und die mit Agglomeraten versorgten Pflanzen waren zu diesem Zeitpunkt am wenigsten grün. Bei einer Aufwandmenge von 3 g N je Gefäß waren am letzten Boniturtermin ebenfalls die mit Grobfraction und Gärrest Ribbeck gedüngten Pflanzen am grünsten, während die mit Feinfraction gedüngten und die ungedüngten Pflanzen die geringsten Blattgrün-Messwerte aufwiesen.

Die Blattgrün-Messwerte fanden zum Teil ihre Entsprechung im Ertrag und in der Ertragsstruktur (Tabelle 29). Die höchsten Kornträge wurden mit 8,2 bzw. 8,3 g je Gefäß durch die hohen Aufwandmengen an Feinfraction und Agglomeraten erzielt, die niedrigsten mit 3,0 bzw. 3,6 g je Gefäß durch die beiden Aufwandmengen der Grobfraction. Die mit Pellets gedüngten Pflanzen ordneten sich dazwischen an. Die unterschiedlichen Kornträge wurden in erster Linie durch die Anzahl an Körnern je Rispe und damit an Körnern je Gefäß erreicht, welche zu einem Zeitpunkt deutlich vor der Blüte festgelegt wird (BBCH-Makrostadium 2 und 3). Bei der Korngrößenverteilung und damit beim Tausendkorngewicht (TKG) wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den Behandlungen festgestellt. Eine Kompensation der geringen Kornzahl je Rispe durch Ausbildung größerer Körner fand somit bei den mit Grobfraction gedüngten Varianten trotz der höheren Blattgrün-Messwerte während der Kornfüllungsphase nicht statt. Aufgrund der geringeren Kornanzahl in Kombination mit der ab der Blüte höheren N-Versorgung der Pflanzen enthielten die Grobfractionvarianten bis zu 4 % mehr Protein im Korn als die mit den anderen Gärprodukten gedüngten Pflanzen. Schäl-mühlen verlangen bei Hafer einen Rohproteingehalt von mindestens 14 % (Beckmann *et al.*, 2001). Dies wurde durch die Düngung mit der Grobfraction (hohe Aufwandmenge) erreicht. Durch die Feinfraction und die Pellets wurde dieser Wert dagegen bei beiden Aufwandmengen mit Rohproteingehalten zwischen 11 und 12 % deutlich unterschritten. Vor allem bei der Feinfraction kam es offensichtlich aufgrund der relativ hohen Kornträge zu einem Verdünnungseffekt in Bezug auf den Proteingehalt im Korn. Die insgesamt betrachtet besten Ergebnisse wurden durch die Agglomerate in der hohen Aufwandmenge erzielt, die bei mehr als 13 % Rohproteingehalt gleichzeitig die höchsten Kornträge erbrachten.

Wie bereits in Kapitel 1.2.2 beschrieben, zerfallen Agglomerate aufgrund der geringeren Verdichtung und Pressung während der Herstellung schneller als Pellets. Dadurch werden enthaltene Nährstoffe schneller pflanzenverfügbar als aus Pellets. Dies erklärt die im vorliegenden Versuch beobachteten Entwicklungs- und Ertragsunterschiede zwischen diesen beiden Gärprodukten. Die aus losen Partikeln bestehende Feinfraction ist am ehesten durch Abbauprozesse im Boden angreifbar, weshalb es nicht überrascht, dass die Düngewirkung dieses Gärproduktes vergleichsweise hoch ausfiel. In der ebenfalls losen Grobfraction sind gröbere, schwer abbaubare Bestandteile wie Holzteile und größere, natürlich entstandene Agglomerate enthalten. Die Nährstofffreisetzung aus der Grobfraction ist deshalb vermutlich geringer als aus der Feinfraction. Hinzu kommt, dass in der Grobfraction aufgrund der mangelhaften Sortierung

Tabelle 29: Ertrag, Ertragsstruktur und Proteingehalt von Hafer im Gefäßversuch 2015. Daten dargestellt als Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer Spalte (Tukey's Test,  $p \leq 0,05$ ).

| Gärprodukt      | Stickstoff<br>(g Gefäß <sup>-1</sup> ) | Produkt-<br>menge<br>(g Gefäß <sup>-1</sup> ) | Strohertrag<br>(g Gefäß <sup>-1</sup> TM)    | Kornertrag<br>bei 86 % TS<br>(g Gefäß <sup>-1</sup> ) | Rispen je<br>Gefäß          | Körner je<br>Rispe           | Körner je Ge-<br>fäß         | TKG (g)                      |
|-----------------|--|---|--|---|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Feinfraktion    | 1                                      | 54,7  | 8,9 $\pm$ 0,2 <sup>bcd</sup>                 | 6,1 $\pm$ 0,2 <sup>de</sup>                           | 10 $\pm$ 0 <sup>a</sup>     | 24 $\pm$ 2 <sup>cde</sup>    | 238 $\pm$ 18 <sup>bcd</sup>  | 25,7 $\pm$ 2,7 <sup>a</sup>  |
|                 | 3                                      | 164,0   | 10,7 $\pm$ 0,7 <sup>e</sup>                  | 8,2 $\pm$ 0,3 <sup>f</sup>                            | 10 $\pm$ 0 <sup>a</sup>     | 35 $\pm$ 4 <sup>f</sup>      | 347 $\pm$ 38 <sup>f</sup>    | 23,8 $\pm$ 2,4 <sup>a</sup>  |
| Agglomerat      | 1                                      | 65,2  | 8,5 $\pm$ 0,1 <sup>bc</sup>                  | 6,1 $\pm$ 0,4 <sup>de</sup>                           | 10 $\pm$ 1 <sup>ab</sup>    | 24 $\pm$ 3 <sup>cde</sup>    | 244 $\pm$ 20 <sup>cd</sup>   | 25,4 $\pm$ 0,8 <sup>a</sup>  |
|                 | 3                                      | 195,7   | 10,5 $\pm$ 0,5 <sup>de</sup>                 | 8,3 $\pm$ 0,6 <sup>f</sup>                            | 10 $\pm$ 0 <sup>a</sup>     | 33 $\pm$ 3 <sup>f</sup>      | 332 $\pm$ 26 <sup>ef</sup>   | 25,1 $\pm$ 1,6 <sup>a</sup>  |
| Pellet          | 1                                      | 67,0  | 7,8 $\pm$ 0,7 <sup>ab</sup>                  | 5,4 $\pm$ 0,7 <sup>cd</sup>                           | 10 $\pm$ 1 <sup>ab</sup>    | 21 $\pm$ 3 <sup>cd</sup>     | 216 $\pm$ 24 <sup>bcd</sup>  | 25,1 $\pm$ 1,9 <sup>a</sup>  |
|                 | 3                                      | 201,0   | 8,8 $\pm$ 0,6 <sup>bcd</sup>                 | 6,9 $\pm$ 0,7 <sup>e</sup>                            | 10 $\pm$ 0 <sup>a</sup>     | 26 $\pm$ 3 <sup>de</sup>     | 264 $\pm$ 27 <sup>d</sup>    | 26,4 $\pm$ 3,0 <sup>a</sup>  |
| Grobfraktion    | 1                                      | 69,8  | 6,3 $\pm$ 0,5 <sup>a</sup>                   | 3,0 $\pm$ 0,7 <sup>a</sup>                            | 10 $\pm$ 1 <sup>ab</sup>    | 13 $\pm$ 2 <sup>a</sup>      | 134 $\pm$ 26 <sup>a</sup>    | 23,3 $\pm$ 7,1 <sup>a</sup>  |
|                 | 3                                      | 209,3   | 7,5 $\pm$ 0,7 <sup>ab</sup>                  | 3,6 $\pm$ 0,3 <sup>ab</sup>                           | 13 $\pm$ 3 <sup>b</sup>     | 14 $\pm$ 1 <sup>ab</sup>     | 175 $\pm$ 40 <sup>ab</sup>   | 21,2 $\pm$ 2,9 <sup>a</sup>  |
| Gärrest Ribbeck | 1                                      | 251,5   | 7,7 $\pm$ 0,5 <sup>ab</sup>                  | 5,1 $\pm$ 0,5 <sup>cd</sup>                           | 10 $\pm$ 0 <sup>a</sup>     | 20 $\pm$ 1 <sup>bcd</sup>    | 199 $\pm$ 11 <sup>bc</sup>   | 25,8 $\pm$ 3,5 <sup>a</sup>  |
|                 | 3                                      | 754,4   | 10,1 $\pm$ 1,4 <sup>cde</sup>                | 6,9 $\pm$ 0,6 <sup>e</sup>                            | 10 $\pm$ 1 <sup>a</sup>     | 28 $\pm$ 4 <sup>ef</sup>     | 274 $\pm$ 38 <sup>de</sup>   | 25,4 $\pm$ 2,3 <sup>a</sup>  |
| Kontrolle       | 0                                      | 0,0   | 6,3 $\pm$ 0,8 <sup>a</sup>                   | 4,6 $\pm$ 0,5 <sup>bc</sup>                           | 10 $\pm$ 1 <sup>ab</sup>    | 18 $\pm$ 2 <sup>abc</sup>    | 182 $\pm$ 22 <sup>abc</sup>  | 25,3 $\pm$ 3,1 <sup>a</sup>  |
| Gärprodukt      | Stickstoff<br>(g Gefäß <sup>-1</sup> ) | Protein-ge-<br>halt<br>im Korn (%)            | Prozentualer Anteil verschiedener Korngrößen |   |                             |                              |                              |                              |
|                 |  |   | > 3,0 mm                                     | 3 - 2,8 mm  | 2,8 - 2,5 mm                | 2,5 - 2,2 mm                 | 2,2 - 2,0 mm                 | < 2,0 mm                     |
| Feinfraktion    | 1                                      | 11,06   | 0,0 $\pm$ 0,0 <sup>a</sup>                   | 1,4 $\pm$ 1,5 <sup>a</sup>                            | 9,9 $\pm$ 3,2 <sup>a</sup>  | 50,1 $\pm$ 3,7 <sup>a</sup>  | 26,1 $\pm$ 7,4 <sup>a</sup>  | 12,5 $\pm$ 1,8 <sup>a</sup>  |
|                 | 3                                      | 11,88   | 0,1 $\pm$ 0,1 <sup>a</sup>                   | 1,3 $\pm$ 1,2 <sup>a</sup>                            | 6,4 $\pm$ 6,9 <sup>a</sup>  | 45,5 $\pm$ 7,9 <sup>a</sup>  | 34,5 $\pm$ 9,7 <sup>a</sup>  | 12,2 $\pm$ 2,7 <sup>a</sup>  |
| Agglomerat      | 1                                      | 10,94   | 0,4 $\pm$ 0,5 <sup>a</sup>                   | 1,4 $\pm$ 0,9 <sup>a</sup>                            | 7,0 $\pm$ 4,9 <sup>a</sup>  | 45,0 $\pm$ 6,5 <sup>a</sup>  | 33,0 $\pm$ 6,7 <sup>a</sup>  | 13,2 $\pm$ 4,1 <sup>a</sup>  |
|                 | 3                                      | 13,13   | 0,2 $\pm$ 0,3 <sup>a</sup>                   | 0,8 $\pm$ 0,6 <sup>a</sup>                            | 6,1 $\pm$ 4,9 <sup>a</sup>  | 50,7 $\pm$ 2,5 <sup>a</sup>  | 30,6 $\pm$ 1,5 <sup>a</sup>  | 11,5 $\pm$ 3,6 <sup>a</sup>  |
| Pellet          | 1                                      | 11,31   | 0,3 $\pm$ 0,4 <sup>a</sup>                   | 2,1 $\pm$ 1,6 <sup>a</sup>                            | 11,7 $\pm$ 4,0 <sup>a</sup> | 43,5 $\pm$ 4,6 <sup>a</sup>  | 24,8 $\pm$ 2,9 <sup>a</sup>  | 17,6 $\pm$ 3,3 <sup>a</sup>  |
|                 | 3                                      | 11,81   | 0,5 $\pm$ 0,8 <sup>a</sup>                   | 2,0 $\pm$ 1,3 <sup>a</sup>                            | 9,3 $\pm$ 5,4 <sup>a</sup>  | 41,5 $\pm$ 5,7 <sup>a</sup>  | 33,0 $\pm$ 9,0 <sup>a</sup>  | 13,8 $\pm$ 2,0 <sup>a</sup>  |
| Grobfraktion    | 1                                      | 13,31   | 0,0 $\pm$ 0,0 <sup>a</sup>                   | 1,5 $\pm$ 1,5 <sup>a</sup>                            | 14,7 $\pm$ 2,0 <sup>a</sup> | 43,2 $\pm$ 4,4 <sup>a</sup>  | 29,4 $\pm$ 9,4 <sup>a</sup>  | 11,3 $\pm$ 4,5 <sup>a</sup>  |
|                 | 3                                      | 15,31   | 0,6 $\pm$ 1,3 <sup>a</sup>                   | 0,6 $\pm$ 1,3 <sup>a</sup>                            | 4,9 $\pm$ 9,2 <sup>a</sup>  | 39,6 $\pm$ 4,4 <sup>a</sup>  | 34,9 $\pm$ 8,5 <sup>a</sup>  | 19,4 $\pm$ 10,8 <sup>a</sup> |
| Gärrest Ribbeck | 1                                      | 12,06   | 0,9 $\pm$ 0,9 <sup>a</sup>                   | 1,3 $\pm$ 1,3 <sup>a</sup>                            | 8,7 $\pm$ 4,8 <sup>a</sup>  | 39,2 $\pm$ 10,5 <sup>a</sup> | 33,1 $\pm$ 12,8 <sup>a</sup> | 16,8 $\pm$ 4,5 <sup>a</sup>  |
|                 | 3                                      | 12,69   | 0,6 $\pm$ 0,3 <sup>a</sup>                   | 1,5 $\pm$ 0,6 <sup>a</sup>                            | 6,1 $\pm$ 1,3 <sup>a</sup>  | 38,4 $\pm$ 6,5 <sup>a</sup>  | 36,1 $\pm$ 6,3 <sup>a</sup>  | 17,4 $\pm$ 2,8 <sup>a</sup>  |
| Kontrolle       | 0                                      | 9,94  | 0,8 $\pm$ 1,2 <sup>a</sup>                   | 2,2 $\pm$ 2,0 <sup>a</sup>                            | 9,0 $\pm$ 4,7 <sup>a</sup>  | 42,8 $\pm$ 5,8 <sup>a</sup>  | 28,9 $\pm$ 7,4 <sup>a</sup>  | 16,2 $\pm$ 3,0 <sup>a</sup>  |

eventuell mehr Störstoffe enthalten sind, die phytotoxisch wirksame Verbindungen abgeben können, und dass die groben Bestandteile dieses Gärrestes möglicherweise physische Sperren im Boden bilden und damit Aufgang und Wurzelbildung der Pflanzen insbesondere zu Beginn der Pflanzenentwicklung behindern. Dies würde die geringe Düngewirkung bzw. die zum Teil sogar negative Wirkung dieses Gärproduktes auf Wachstum und Ertragsbildung der Pflanzen im Versuch erklären.

In Tabelle 29 sind auch die Ergebnisse der Siebsortierung dargestellt. Wie bereits erwähnt, gab es in keiner der Korngrößenklassen signifikante Unterschiede zwischen den Gärprodukten und der Kontrolle. Zu den wichtigsten Qualitätsanforderungen an Hafer gehört, dass mindestens 90 % der Körner einen Durchmesser von über 2,0 mm besitzen und dass das Tausendkorngewicht (TKG) über 30 Gramm beträgt (Schreiber *et al.*, 2009). Beides wurde weder durch die Pflanzen der Kontrolle erreicht, noch durch die mit den verschiedenen Gärprodukten gedüngten Pflanzen. Auch die Erhöhung der Aufwandmenge von ein auf drei Gramm Stickstoff führte nicht zum Erreichen dieser Qualitätsmerkmale.

Der Strohertrag bei der niedrigeren Aufwandmenge war bei Grobfraction und Kontrolle mit 6,3 g je Gefäß signifikant geringer als in den anderen Varianten, die zwischen 7,7 g (Gärrest Ribbeck) und 8,9 g (Feinfraction) erbrachten. Die höchsten Stroherträge wurden mit 10,5 bzw. 10,7 g durch die hohen Aufwandmengen von Agglomeraten und Feinfraction erzielt, also durch die beiden Varianten, die auch die größten Pflanzenlängen aufwiesen. In Bezug auf den Kornertrag wurden durch alle Gärprodukte mit Ausnahme der Grobfraction signifikante Steigerungen durch die Erhöhung der Aufwandmenge von ein auf drei g Stickstoff je Gefäß erzielt. Beim Strohertrag trifft dies auf die Agglomerate, die Feinfraction und den Gärrest aus Ribbeck zu.

Die Gehalte an Stickstoff, Phosphor und Kalium im Erntegut von Hafer sind in Tabelle 30 aufgelistet. Stickstoff wurde in allen Varianten stärker in das Korn als in das Stroh eingelagert. Dies entspricht den Untersuchungen von Powlson *et al.* (1985), die bei Weizen ca. 80 % des Gesamtstickstoffs im Korn und 20 % in Stroh und Spelzen fanden. Ähnlich wie beim Proteingehalt im Korn waren die Stickstoffgehalte im Stroh ebenfalls bei der Grobfraction am höchsten und bei den Agglomeraten, der Feinfraction und der ungedüngten Kontrolle am geringsten. Phosphor und Kalium wurden vor allem im Stroh eingelagert. Die Phosphorgehalte in Stroh und Korn und die Kaliumgehalte im Korn waren bei beiden Aufwandmengen in den mit Grobfraction gedüngten Pflanzen am höchsten. Die Kaliumgehalte im Stroh waren demgegenüber bei den mit Pellet gedüngten Pflanzen am höchsten. Gleichzeitig führte die Anwendung der Pellets (Aufwandmenge 1 g) und der Agglomerate (Aufwandmenge 3 g) zu den geringsten Kaliumgehalten im Korn. Die Resultate bestätigen für Phosphor die Ergebnisse von Feil und Bänziger (1999), die bei Sommerweizen eine starke negative Korrelation zwischen Kornertrag und Phosphorgehalt im Korn feststellten. Die gleichen Autoren fanden aber keinen Zusammenhang zwischen dem Ertrag und dem Kaliumgehalt im Korn, während im hier vorliegenden Versuch niedrige Erträge zu höheren Gehalten im Korn zu führen schienen. Aufgrund der fehlenden Wiederholungen bei den chemischen Untersuchungen ist dieser Trend jedoch statistisch nicht abzusichern.

Tabelle 30: Gehalte an Stickstoff, Phosphor und Kalium im Erntegut von Hafer im Gefäßversuch 2015

| Pro-<br>ben-<br>mate-<br>rial |       | Variante           | N<br>(g Gefäß <sup>-1</sup> ) | N                  | P            | K              |
|-------------------------------|-------|--------------------|-------------------------------|--------------------|--------------|----------------|
|                               |       |                    |                               | g kg <sup>-1</sup> |              |                |
| Hafer                         | Korn  | Feinfraktion       | 1<br>3                        | 17,70<br>19,00     | 5,60<br>5,62 | 5,69<br>5,57   |
|                               |       | Agglomerat         | 1<br>3                        | 17,50<br>21,00     | 5,66<br>5,46 | 6,03<br>5,39   |
|                               |       | Pellet             | 1<br>3                        | 18,10<br>18,90     | 4,98<br>5,29 | 5,59<br>5,92   |
|                               |       | Grobfraktion       | 1<br>3                        | 21,30<br>24,50     | 6,37<br>6,92 | 7,03<br>7,99   |
|                               |       | Gärrest<br>Ribbeck | 1<br>3                        | 19,30<br>20,30     | 5,68<br>5,48 | 6,62<br>7,01   |
|                               |       | Kontrolle          | 0                             | 15,90              | 5,32         | 6,19           |
|                               | Stroh | Feinfraktion       | 1<br>3                        | 3,10<br>2,90       | 4,00<br>2,67 | 24,71<br>24,52 |
|                               |       | Agglomerat         | 1<br>3                        | 2,70<br>3,00       | 3,70<br>2,41 | 26,66<br>26,47 |
|                               |       | Pellet             | 1<br>3                        | 4,00<br>4,10       | 5,03<br>3,48 | 28,83<br>32,68 |
|                               |       | Grobfraktion       | 1<br>3                        | 8,40<br>10,50      | 8,87<br>9,17 | 25,12<br>28,84 |
|                               |       | Gärrest<br>Ribbeck | 1<br>3                        | 6,90<br>8,40       | 7,09<br>6,47 | 24,57<br>28,34 |
|                               |       | Kontrolle          | 0                             | 3,20               | 4,54         | 24,45          |

Schneider (2015) gibt für Getreidestroh Durchschnittsgehalte von 5 g kg<sup>-1</sup> Stickstoff, 3 g kg<sup>-1</sup> Phosphor und zwischen 12 und 22 g kg<sup>-1</sup> Kalium an. Die Stickstoffgehalte der Varianten Grobfraktion und Gärrest Ribbeck lagen deutlich über diesen Durchschnittsgehalten, die der anderen Varianten darunter. Auch die Phosphorgehalte im Stroh waren bei Grobfraktion und Gärrest Ribbeck mehr als doppelt so hoch wie die angegebenen Durchschnittswerte. Die Kaliumgehalte im Stroh waren bei allen Varianten überdurchschnittlich hoch. Die Gehalte an P und K im Haferkorn werden in der DLG-Futterwerttabelle und der von der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft herausgegebenen Fütterungsfibel für die ökologische Schweinehaltung mit rund 3,6 bzw. 4,5 g je kg<sup>-1</sup> angegeben (Böhm, 2007). Beide Durchschnittswerte wurden im Versuch durch alle Varianten deutlich überschritten.

In Tabelle 31 sind die durch die Haferpflanzen entzogenen Mengen an Stickstoff, Phosphor und Kalium sowie die jeweilige Bilanz (durch Pflanzen aufgenommener prozentualer Anteil des ausgebrachten Nährstoffs) je Gefäß dargestellt. In der niedrigen Aufwandmenge wurden rein rechnerisch zwischen 11 (Agglomerate und Grobfraktion) und 14 % (Gärrest Ribbeck) des ausgebrachten Stickstoffs durch die Pflanzen aufgenommen, in der hohen Aufwandmenge zwischen 5 (Pellets, Grobfraktion, Feinfraktion) und 7 % (Gärrest Ribbeck). Dies deckt sich mit den Angaben, die Lammert *et al.* (2004) für stabile, sehr reife, häufig umgesetzte Komposte machen. Die Autoren gehen in Bezug auf diese Kompostform nach ausführlicher Literaturrecherche und Praxisbefragung von einer Stickstoffverfügbarkeit zwischen 5 und 15 % im Anwendungsjahr und einer sehr langsamen Mineralisierung des Materials aus. Kluge *et al.* (2008) geben sogar an, dass nach



einmaliger Kompostanwendung in den ersten drei Jahren jährlich nur maximal 3 - 5 % der N-Zufuhr düngewirksam anrechenbar sind.

Tabelle 31: Durch die Gärprodukte ausgebrachte und durch Hafer entzogene Mengen an Stickstoff, Phosphor und Kalium im Gefäßversuch 2015. Daten sind Mittelwerte aus Doppelbestimmungen.

| Nähr-<br>element | Gärprodukt und<br>Aufwandmenge | Ausgebrachte<br>Menge<br>(g Gefäß <sup>-1</sup> ) | Entzug                |       |                                |
|------------------|--------------------------------|---|-----------------------|-------|--------------------------------|
|                  |                                |   | g Gefäß <sup>-1</sup> |       | % der ausge-<br>brachten Menge |
|                  |                                |   | Korn                  | Stroh |                                |
| Stickstoff       | Feinfraktion (1 g N)           | 1,00  | 0,09                  | 0,03  | 12,02                          |
|                  | Feinfraktion (3 g N)           | 3,00  | 0,13                  | 0,03  | 5,50                           |
|                  | Agglomerat (1 g N)             | 1,00  | 0,09                  | 0,02  | 11,47                          |
|                  | Agglomerat (3 g N)             | 3,00  | 0,15                  | 0,03  | 6,07                           |
|                  | Pellet (1 g N)                 | 1,00  | 0,09                  | 0,03  | 11,75                          |
|                  | Pellet (3 g N)                 | 3,00  | 0,11                  | 0,04  | 4,96                           |
|                  | Grobfraktion (1 g N)           | 1,00  | 0,06                  | 0,05  | 10,80                          |
|                  | Grobfraktion (3 g N)           | 3,00  | 0,08                  | 0,08  | 5,18                           |
|                  | Gärrest Ribbeck (1 g N)        | 1,00  | 0,08                  | 0,05  | 13,78                          |
|                  | Gärrest Ribbeck (3 g N)        | 3,00  | 0,12                  | 0,08  | 6,86                           |
|                  | Kontrolle                      | 0,00  | 0,06                  | 0,02  | -                              |
| Phosphor         | Feinfraktion (1 g N)           | 0,15  | 0,03                  | 0,04  | 43,37                          |
|                  | Feinfraktion (3 g N)           | 0,45  | 0,04                  | 0,03  | 15,18                          |
|                  | Agglomerat (1 g N)             | 0,20  | 0,03                  | 0,03  | 30,58                          |
|                  | Agglomerat (3 g N)             | 0,60  | 0,04                  | 0,03  | 10,75                          |
|                  | Pellet (1 g N)                 | 0,19  | 0,02                  | 0,04  | 32,59                          |
|                  | Pellet (3 g N)                 | 0,58  | 0,03                  | 0,03  | 10,76                          |
|                  | Grobfraktion (1 g N)           | 0,24  | 0,02                  | 0,06  | 29,94                          |
|                  | Grobfraktion (3 g N)           | 0,72  | 0,02                  | 0,07  | 12,51                          |
|                  | Gärrest Ribbeck (1 g N)        | n.b.  | 0,02                  | 0,05  | -                              |
|                  | Gärrest Ribbeck (3 g N)        | n.b.  | 0,03                  | 0,07  | -                              |
|                  | Kontrolle                      | 0,00  | 0,02                  | 0,03  | -                              |
| Kalium           | Feinfraktion (1 g N)           | 0,73  | 0,03                  | 0,22  | 34,32                          |
|                  | Feinfraktion (3 g N)           | 2,18  | 0,04                  | 0,26  | 13,79                          |
|                  | Agglomerat (1 g N)             | 0,92  | 0,03                  | 0,23  | 28,11                          |
|                  | Agglomerat (3 g N)             | 2,76  | 0,04                  | 0,28  | 11,51                          |
|                  | Pellet (1 g N)                 | 0,91  | 0,03                  | 0,22  | 27,55                          |
|                  | Pellet (3 g N)                 | 2,73  | 0,04                  | 0,29  | 11,87                          |
|                  | Grobfraktion (1 g N)           | 0,98  | 0,02                  | 0,16  | 18,00                          |
|                  | Grobfraktion (3 g N)           | 2,93  | 0,02                  | 0,22  | 8,25                           |
|                  | Gärrest Ribbeck (1 g N)        | n.b.  | 0,03                  | 0,19  | -                              |
|                  | Gärrest Ribbeck (3 g N)        | n.b.  | 0,04                  | 0,29  | -                              |
|                  | Kontrolle                      | 0,00  | 0,02                  | 0,15  | -                              |

Phosphor wurde in der niedrigen Aufwandmenge zu 30 (Grobfraktion) bis 43 % (Feinfraktion) aufgenommen, während in der hohen Aufwandmenge zwischen 11 (Agglomerate, Pellets) und 15 % (Feinfraktion) des eingebrachten Phosphors durch die Pflanzen wieder entzogen wurden. Bei Kalium wurden in der niedrigen Aufwandmenge zwischen 18 (Grobfraktion) und 34 % (Feinfraktion) der ausgebrachten Menge entzogen und in der hohen Aufwandmenge zwischen 8 (Grobfraktion) und 14 % (Feinfraktion). Die Stickstoff- und Phosphorverfügbarkeit entspricht den Werten, die Kirsch (2002) in einer ähnlichen Arbeit zu kompostierten Gärresten ermittelte. Für Kalium stellte dieser Autor allerdings eine Verfügbarkeit zwischen 75 und 85 % fest, was für die hier untersuchten Produkte nicht bestätigt werden konnte.

Der pH-Wert des Bodens stieg in allen Gefäßen unabhängig von der Anwendung der Gärprodukte um 0,6 bis 0,7 (Tabelle 32). Da dies auch in der Kontrolle erfolgte und keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Aufwandmengen der Gärprodukte zu erkennen sind, ist davon auszugehen, dass dieser Effekt nicht oder nicht nur auf die Anwendung der Gärprodukte zurückzuführen ist. Insbesondere bei Nährstoffmangel wäre eher davon auszugehen, dass durch die Pflanzenwurzeln Wasserstoffionen abgegeben und der pH-Wert somit abgesenkt wird mit dem Ziel, die Nährstoffverfügbarkeit durch Ionenaustausch zu erhöhen (Tüffers, 2009). Der pH-Anstieg, der demgegenüber auch in den Kontrollgefäßen beobachtet wurde, ist möglicherweise auf hohe Kalkgehalte im Gießwasser zurückzuführen. Dies bleibt jedoch ungeklärt.

Die Kohlenstoffgehalte des Bodens wurden durch den Einsatz aller Gärprodukte erhöht (Tabelle 32). Ein leichter Anstieg der Kohlenstoffgehalte war auch in der unbehandelten Kontrolle zu beobachten, was auf Wurzelrückstände im Boden zurückzuführen ist. Dieser Anstieg fiel jedoch in allen Fällen erwartungsgemäß geringer aus als in den mit Gärprodukten gedüngten Gefäßen.

Tabelle 32: Gehalte an Gesamt-, organischem und heißwasserlöslichem Kohlenstoff und pH-Werte des Bodens im Gefäßversuch mit Hafer im Jahr 2015. Daten sind Mittelwerte aus Doppelbestimmungen.

| Probe-<br>nahme             | Variante           | N<br>(g Gefäß <sup>-1</sup> ) | C <sub>ges</sub> | C <sub>org</sub> | C <sub>hwl</sub>   | pH-Wert |
|-----------------------------|--------------------|-------------------------------|------------------|------------------|--------------------|---------|
|                             |                    |                               | % TM             |                  | g kg <sup>-1</sup> |         |
| Boden vor Versuchsbeginn    |                    |                               | 1,55             | 1,06             | 0,09               | 6,8     |
| Nach der Ernte von<br>Hafer | Feinfraktion       | 1                             | 1,80             | 1,34             | 0,18               | 7,4     |
|                             |                    | 3                             | 2,15             | 1,36             | 0,23               | 7,5     |
|                             | Agglomerat         | 1                             | 1,89             | 1,21             | 0,17               | 7,5     |
|                             |                    | 3                             | 1,82             | 1,69             | 0,16               | 7,4     |
|                             | Pellet             | 1                             | 1,91             | 1,54             | 0,20               | 7,5     |
|                             |                    | 3                             | 1,91             | 1,39             | 0,23               | 7,5     |
|                             | Grobfraktion       | 1                             | 1,84             | 1,35             | 0,19               | 7,5     |
|                             |                    | 3                             | 2,09             | 1,67             | 0,21               | 7,5     |
|                             | Gärrest<br>Ribbeck | 1                             | 1,98             | 1,25             | 0,19               | 7,4     |
|                             |                    | 3                             | 2,07             | 1,41             | 0,27               | 7,4     |
| Kontrolle                   | 0                  | 1,74                          | 1,13             | 0,15             | 7,4                |         |

Die Feinfraktion erhöhte den Gehalt an C<sub>ges</sub> am stärksten, während die Agglomerate zur höchsten Steigerung des C<sub>org</sub>-Gehaltes führten. Der organische gebundene Kohlenstoff im Boden ist charakteristisch für den Humusgehalt und die biologische Aktivität im Boden (Blume *et al.*, 2010). Die Ausbringung organischer Dünger dient neben der Zufuhr von Nährstoffen vor allem dazu, die organische Substanz zu ersetzen, die durch Mineralisierungsvorgänge und ackerbauliche Nutzung des Bodens abgebaut worden ist. Dies ist erforderlich, um die Fruchtbarkeit und damit Ertragsfähigkeit des Bodens langfristig zu erhalten (Diepenbrock *et al.*, 2016). Unter diesem Gesichtspunkt ist die Anwendung der Gärprodukte als positiv anzusehen, da sie zu einem deutlichen Anstieg der Gehalte an organischer Substanz führen. Der Gehalt an heißwasserlöslichem Kohlenstoff (C<sub>hwl</sub>) wurde durch alle Gärprodukte erhöht. Vor allem in der hohen Aufwandmenge waren deutliche Unterschiede zwischen Fein- und Grobfraktion und Gärrest Ribbeck einerseits und Agglomeraten und Pellets andererseits zu erkennen, wobei letztere die C<sub>hwl</sub>-Gehalte deutlich weniger steigen ließen als die erste Gruppe. Heißwasserlöslicher Kohlenstoff stellt den Teil der orga-

nischen Substanz dar, der leicht mineralisierbar ist, und wird auch als aktive organische Bodensubstanz bezeichnet (Merbach *et al.*, 1999; Schubert, 2011). Hohe  $C_{\text{hwl}}$ -Gehalte in Kombination mit einem weiten C/N-Verhältnis sind Indikatoren für ein wenig abgebautes, kohlehydratreiches und N-armes Material (Kalbitz und Knappe, 1997). Die Bedeutung liegt in der großen Mobilität im Boden und in der Funktion als Träger von Nährstoffen (Sümer, 2012). Nach Beerbaum (2003) ist dies die einzige Kohlenstofffraktion, die kurzfristig durch den Menschen beeinflusst werden kann. Gleichzeitig sind die Gehalte an heißwasserlöslichem Kohlenstoff, in Abhängigkeit von der angebauten Pflanzenart und den Bewirtschaftungsmaßnahmen, in allen Böden annähernd gleich und können deswegen unabhängig von der Bodenart als Indikator für eine ausreichende Nachlieferung an organischer Substanz dienen (Beerbaum, 2003). Schulz (1997) hat  $C_{\text{hwl}}$ -Bereiche definiert und daraus Gehaltsklassen der organischen Bodensubstanz abgeleitet (Tabelle 33).

Tabelle 33:  $C_{\text{hwl}}$ -Bereiche zur Ableitung von OS-Gehaltsklassen für grundwasserferne Sand- und Lehmböden mit Jahresdurchschnittstemperaturen von 6-10°C und Jahresniederschlägen von 400-800 mm. Nach Schulz (1997)

| $C_{\text{hwl}}$ -Bereich ( $\text{g kg}^{-1}$ ) | Gehaltsklasse           |
|--|-------------------------|
| > 0,40   | 1 (sehr hoch)           |
| 0,30 - 0,40                                      | 2 (hoch)                |
| 0,25 - 0,30                                      | 3 (mittel, anzustreben) |
| 0,20 - 0,25                                      | 4 (gering)              |
| < 0,20   | 5 (sehr gering)         |

Demzufolge wurde der sehr geringe Ausgangsgehalt des Bodens durch die Anwendung der hohen Aufwandmenge der Gärprodukte auf die Gehaltsklasse „gering“ bis „mittel“ angehoben. Einzige Ausnahme bildeten hier die Agglomerate. Ursache hierfür ist möglicherweise der etwas geringere Anteil an organischem Kohlenstoff und organischer Trockensubstanz und das engere C/N-Verhältnis in den Agglomeraten (vergl. Tabelle 3). Ein Anstieg der  $C_{\text{hwl}}$ -Gehalte ist in Bezug auf die Bodenfruchtbarkeit als positiv zu bewerten, da dadurch Nährstoffquellen bzw. Bindungsplätze für Nährstoffe in der Bodenlösung geschaffen werden. Der Anstieg durch die Gärprodukte bewegt sich jedoch auf niedrigem Niveau und wird durch Agglomeration bzw. Pelletierung weiter verringert.

### Hafer 2016

Im Jahr 2016 wurden die Gärprodukte der Kategorie 2 getestet, sowie Pellets und Agglomerate aus dem Jahr 2015. Die Variante Agglo2015 konnte allerdings aufgrund von Mäusebefall nach der Blüte zwar bonitiert, aber im Hinblick auf den Ertrag nicht ausgewertet werden.

Die Entwicklung der Wuchshöhe ist in Abbildung 19 dargestellt. Ab der vierten Woche nach der Aussaat bildeten sich zwei Gruppen, die unterschiedlich stark wuchsen. Zur Gruppe der vergleichsweise klein bleibenden Pflanzen gehörten die ungedüngte Kontrolle, sowie die mit Agglo2015, Pellet2015 und AggloGr gedüngten Varianten. Das Wachstum dieser Gruppe verlief relativ gleichmäßig bis zum Erreichen der maximalen Wuchshöhe während der Blüte, wobei zwischen Woche sechs und zehn die Pflanzen der AggloGr-Variante etwas stärker wuchsen als die der anderen Behandlungen. Bei der zweiten Gruppe, zu der alle Gärprodukte der Kategorie 2

sowie die KAS-Variante gehörten, war zwischen der sechsten und siebten Woche ein starker Wachstumsschub von rund 20 cm zu beobachten.

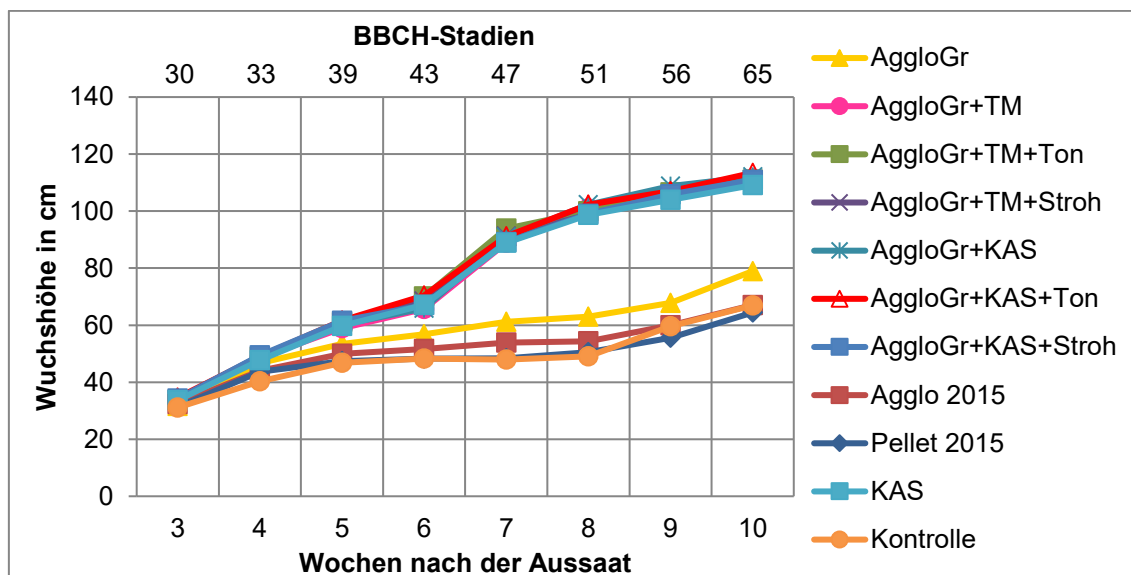


Abbildung 19: Entwicklung der Wuchshöhe von Hafer im Gefäßversuch 2016

Auch im Zeitraum davor und danach war das Wachstum dieser Pflanzen ausgeprägter als bei den Varianten der anderen Gruppe. Zum letzten Boniturtermin waren die mit Pellet2015 und Agglo2015 gedüngten Pflanzen und die Kontrollpflanzen mit Wuchshöhen zwischen 64 und 67 cm signifikant (einfaktorielle ANOVA,  $p \leq 0,05$ ) kleiner als die mit AggloGr (79 cm) behandelten Pflanzen. Diese waren wiederum signifikant kleiner als die mit allen anderen Gärprodukten und mit KAS gedüngten Pflanzen, die Wuchshöhen zwischen 109 und 113 cm erreichten. Obwohl die Gärprodukte Agglo2015 und Pellet2015 aus anderen Lieferungen stammten als die im Jahr zuvor verwendeten Agglomerate und Pellets, zeigte sich damit der gleiche Verlauf wie im Jahr 2015. Auch im ersten Versuch konnte zwischen der Kontrolle und diesen beiden Gärprodukten kein Unterschied in Bezug auf die maximale Wuchshöhe festgestellt werden.

Die Entwicklung des Blattgrüns im Jahr 2016 ist in Abbildung 20 dargestellt. Ähnlich wie bei der Wuchshöhe entstanden von Beginn der Messung an zwei Gruppen, wobei zur ersten, weniger grünen Gruppe die Kontrolle und die Varianten Agglo2015, Pellet2015 und AggloGr gehörten, während alle anderen Gärprodukte und KAS die zweite, deutlich grünere Gruppe bildeten. Bei der ersten Gruppe zeigte sich ähnlich wie im Jahr 2015 ein Abfall der Blattgrün-Messwerte bis zur siebten Woche nach der Aussaat, gefolgt von einem Anstieg etwa bis zum erneuten Erreichen der Ausgangswerte während der Blüte. Bei der anderen Gruppe war bis zur Mitte der Blüte ein kontinuierlicher Anstieg der Blattgrün-Messwerte zu verzeichnen. Am letzten Boniturtermin, bei dem alle Varianten untersucht werden konnten (Woche 12, vor dem Einsetzen der Blattseneszenz), waren die Pflanzen der Kontrolle mit einem Wert von 356 signifikant am wenigsten grün, gefolgt von den mit Agglo2015 und Pellet2015 gedüngten Pflanzen. Mit einem Wert von 466 waren die AggloGr-Pflanzen grüner als diese beiden Varianten. Die Anwendung aller anderen Gärprodukte und KAS führte zu signifikant grüneren Pflanzen, bei denen in Woche 12 Blattgrünwerte von über 800 gemessen wurden.

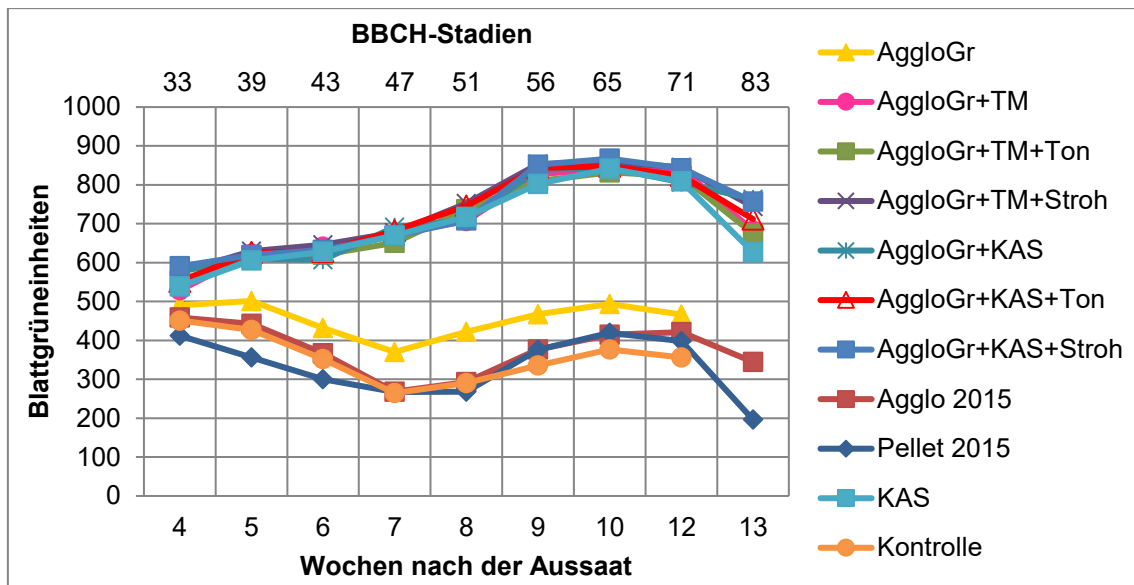


Abbildung 20: Entwicklung des Blattgrüns bei Hafer im Gefäßversuch 2016

Die Unterschiede zwischen den Versuchen und den verschiedenen Behandlungen waren sowohl in Bezug auf die Wuchshöhe als auch in Hinblick auf die Blattfärbung so groß, dass sie auch ohne Messinstrumente wahrnehmbar waren (Abbildung 21).

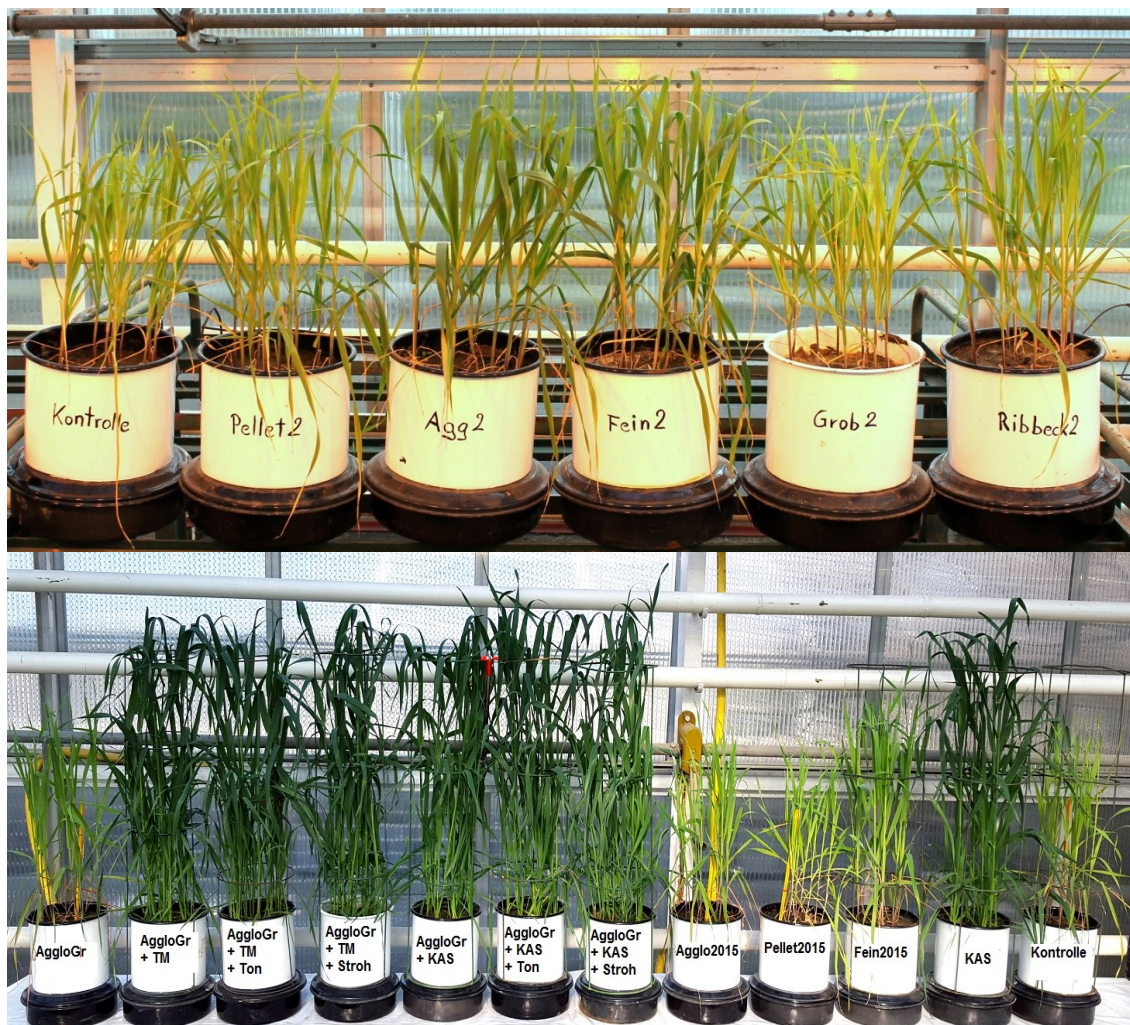


Abbildung 21: Haferpflanzen jeweils ca. acht Wochen nach der Aussaat im Gefäßversuch 2015 (oben, Varianten mit 3 g Gefäß<sup>-1</sup> N) und 2016 (unten)

Die kleineren, weniger grünen Pflanzen erbrachten am Ende des Versuches den niedrigsten Kornertag (Tabelle 34). Dieser war somit bei Kontrolle, Pellet2015 und AggloGr mit 5,7 bzw. 6,4 und 12,0 g je Gefäß signifikant geringer als bei allen anderen Pflanzen, die zwischen 38,4 (AggloGr+TM) und 48,0 g (KAS) erbrachten. Die Ertragsunterschiede beruhten in erster Linie auf der Anzahl der Rispen je Gefäß und der Anzahl der Körner je Rispe, während beim Tausendkorngewicht keine signifikanten Unterschiede zu verzeichnen waren. Die Anwendung von AggloGr führte zu den wenigsten Rispen je Gefäß (10), erbrachte aber signifikant mehr Körner je Rispe. Dies war auch im Jahr 2015 der Fall, als durch die Agglomerate bei einer Aufwandmenge entsprechend 3 g N je Gefäß signifikant mehr Körner je Rispe ausgebildet wurden als durch die Pellets bzw. in der ungedüngten Kontrolle.

Hinsichtlich der Qualitätsanforderungen wurde das verlangte TKG von 30 Gramm nur durch die Varianten mit wenigen Körnern erreicht, also durch AggloGr, Pellet2015 und Kontrolle. Alle anderen Varianten blieben knapp darunter. Im Gegensatz dazu wurde der geforderte Proteingehalt von mehr als 14 % von allen Varianten außer AggloGr, Pellet2015 und Kontrolle erreicht, während diese drei mit 10,4; 11,5 und 10 % deutlich darunter blieben. Alle Pflanzen außer den mit AggloGr+KAS+Stroh versorgten lieferten zudem Körner, die zu über 90 % einen Durchmesser größer 2 mm besaßen.

Beim Strohertrag entsprach das Ergebnis dem des Kornetrags und der Wuchshöhe. AggloGr, Pellet2015 und Kontrolle lieferten mit 6,9 bis 11,3 g je Gefäß die signifikant geringsten Stroherträge, während alle anderen Gärprodukte sowie KAS mit 39,6 (AggloGr+TM) bis 45,6 g (AggloGr+KAS+Ton) deutlich höhere Stroherträge erzielten.

In Tabelle 35 sind die Gehalte an Stickstoff, Phosphor und Kalium in Korn und Stroh von Hafer aufgeführt. Während sich die Phosphorgehalte im Korn in allen Varianten etwa auf dem gleichen Niveau bewegten wie im Versuch 2015, waren die Kaliumgehalte im Korn in den Varianten mit Gärprodukten der Kategorie 2 etwa doppelt so hoch wie im Jahr 2015. Die Schwankungen zwischen den Wiederholungen waren jedoch so groß, dass zwischen den verschiedenen Behandlungen keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden konnten.

Die Kalium- und Phosphorgehalte im Stroh waren im Jahr 2016 bei den mit Gärprodukten der Kategorie 2 und den mit KAS gedüngten Pflanzen signifikant geringer als in der ungedüngten Kontrolle bzw. bei AggloGr und Pellet2015. Durch das Hinzufügen der beiden Stickstoffquellen KAS und Tiermehl wurde der Gehalt an Gärrest je Agglomerat verringert. Dies führte unter anderem zur Reduktion der Phosphor- und Kaliumgehalte. Die ausgebrachte Menge an Phosphor war bei den Gärprodukten mit Zuschlagstoffen um bis zu 87 % (AggloGr+KAS+Ton) geringer als bei den Agglomeraten ohne Zuschlagstoffe (AggloGr). Für Kalium betrug die Reduktion bis zu 82 %. Der durch die sehr gute Stickstoffversorgung ausgelöste hohe Kornertag und die gleichzeitig ungenügende Versorgung mit anderen Nährstoffen führten offensichtlich zu einer Umverteilung der Nährstoffe aus den Blättern in die Körner.



Tabelle 34: Ertrag, Ertragsstruktur und Proteingehalt von Hafer im Gefäßversuch 2016. Daten dargestellt als Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer Spalte (Tukey's Test,  $p \leq 0,05$ ). Bei Varianten markiert mit \* konnten nur drei Wiederholungen in die Auswertung einbezogen werden.

| Variante              | Stickstoff<br>(g Gefäß <sup>-1</sup> ) | Produktmenge<br>(g Gefäß <sup>-1</sup> ) | Strohertrag<br>(g Gefäß <sup>-1</sup> TM) | Kornertrag bei<br>86 % TS<br>(g Gefäß <sup>-1</sup> ) | Rispen<br>Je Gefäß      | Körner<br>Je Rispe       | Körner<br>je Gefäß          | TKG (g)                     |
|-----------------------|--|--|---|---|-------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| AggloGr*              | 3                                      | 336,4                                    | 11,3 $\pm$ 1,0 <sup>a</sup>               | 12,0 $\pm$ 1,3 <sup>a</sup>                           | 10 $\pm$ 1 <sup>a</sup> | 37 $\pm$ 3 <sup>b</sup>  | 381 $\pm$ 19 <sup>a</sup>   | 31,5 $\pm$ 2,1 <sup>a</sup> |
| AggloGr + TM          |  | 63,4                                     | 39,6 $\pm$ 3,8 <sup>b</sup>               | 38,4 $\pm$ 0,4 <sup>b</sup>                           | 30 $\pm$ 3 <sup>b</sup> | 45 $\pm$ 6 <sup>bc</sup> | 1357 $\pm$ 146 <sup>b</sup> | 28,6 $\pm$ 3,2 <sup>a</sup> |
| AggloGr + TM + Ton    |  | 79,2                                     | 41,1 $\pm$ 1,3 <sup>b</sup>               | 46,6 $\pm$ 2,2 <sup>b</sup>                           | 29 $\pm$ 4 <sup>b</sup> | 57 $\pm$ 10 <sup>c</sup> | 1606 $\pm$ 140 <sup>b</sup> | 29,2 $\pm$ 2,1 <sup>a</sup> |
| AggloGr + TM + Stroh  |  | 60,0                                     | 42,4 $\pm$ 1,6 <sup>b</sup>               | 45,9 $\pm$ 3,7 <sup>b</sup>                           | 34 $\pm$ 3 <sup>b</sup> | 49 $\pm$ 9 <sup>bc</sup> | 1665 $\pm$ 198 <sup>b</sup> | 27,7 $\pm$ 2,0 <sup>a</sup> |
| AggloGr + KAS         |  | 86,7                                     | 43,0 $\pm$ 1,8 <sup>b</sup>               | 47,7 $\pm$ 4,7 <sup>b</sup>                           | 36 $\pm$ 2 <sup>b</sup> | 49 $\pm$ 7 <sup>bc</sup> | 1742 $\pm$ 289 <sup>b</sup> | 27,6 $\pm$ 2,6 <sup>a</sup> |
| AggloGr + KAS + Ton   |  | 81,8                                     | 45,6 $\pm$ 5,0 <sup>b</sup>               | 47,2 $\pm$ 6,4 <sup>b</sup>                           | 32 $\pm$ 2 <sup>b</sup> | 55 $\pm$ 7 <sup>c</sup>  | 1730 $\pm$ 130 <sup>b</sup> | 27,2 $\pm$ 1,7 <sup>a</sup> |
| AggloGr + KAS + Stroh |  | 93,9                                     | 44,8 $\pm$ 4,9 <sup>b</sup>               | 44,5 $\pm$ 5,3 <sup>b</sup>                           | 35 $\pm$ 3 <sup>b</sup> | 49 $\pm$ 2 <sup>bc</sup> | 1697 $\pm$ 213 <sup>b</sup> | 26,3 $\pm$ 2,2 <sup>a</sup> |
| Pellet2015            |  | 340,0                                    | 8,4 $\pm$ 0,9 <sup>a</sup>                | 6,4 $\pm$ 0,7 <sup>a</sup>                            | 16 $\pm$ 5 <sup>a</sup> | 14 $\pm$ 2 <sup>a</sup>  | 212 $\pm$ 28 <sup>a</sup>   | 30,4 $\pm$ 1,2 <sup>a</sup> |
| KAS                   | 0                                      | 11,1                                     | 40,3 $\pm$ 3,6 <sup>b</sup>               | 48,0 $\pm$ 7,4 <sup>b</sup>                           | 30 $\pm$ 1 <sup>b</sup> | 59 $\pm$ 12 <sup>c</sup> | 1770 $\pm$ 357 <sup>b</sup> | 27,3 $\pm$ 2,1 <sup>a</sup> |
| Kontrolle*            |  | 0,0                                      | 6,9 $\pm$ 1,1 <sup>a</sup>                | 5,7 $\pm$ 2,1 <sup>a</sup>                            | 11 $\pm$ 2 <sup>a</sup> | 18 $\pm$ 9 <sup>a</sup>  | 190 $\pm$ 73 <sup>a</sup>   | 30,4 $\pm$ 1,1 <sup>a</sup> |

| Variante              | Stickstoff<br>(g Gefäß <sup>-1</sup> ) | Proteingehalt<br>im Korn (%) | Prozentualer Anteil verschiedener Korngrößen |                               |                              |                                |                              |                              |
|-----------------------|--|------------------------------|--|-------------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|
|                       |  |                              | > 3,0 mm                                     | 3 - 2,8 mm                    | 2,8 - 2,5 mm                 | 2,5 - 2,2 mm                   | 2,2 - 2,0 mm                 | < 2,0 mm                     |
| AggloGr*              | 3                                      | 10,4 $\pm$ 0,9 <sup>a</sup>  | 0,2 $\pm$ 0,2 <sup>a</sup>                   | 1,8 $\pm$ 0,9 <sup>a</sup>    | 21,1 $\pm$ 13,5 <sup>a</sup> | 58,3 $\pm$ 8,8 <sup>cd</sup>   | 15,9 $\pm$ 5,1 <sup>a</sup>  | 2,6 $\pm$ 1,6 <sup>a</sup>   |
| AggloGr + TM          |  | 15,5 $\pm$ 0,4 <sup>b</sup>  | 2,3 $\pm$ 1,2 <sup>ab</sup>                  | 12,3 $\pm$ 3,3 <sup>cd</sup>  | 30,2 $\pm$ 6,9 <sup>a</sup>  | 36,4 $\pm$ 5,0 <sup>ab</sup>   | 13,8 $\pm$ 5,3 <sup>a</sup>  | 5,0 $\pm$ 2,3 <sup>a</sup>   |
| AggloGr + TM + Ton    |  | 14,8 $\pm$ 0,1 <sup>b</sup>  | 3,2 $\pm$ 1,7 <sup>ab</sup>                  | 15,0 $\pm$ 3,1 <sup>d</sup>   | 34,5 $\pm$ 6,5 <sup>a</sup>  | 34,4 $\pm$ 4,6 <sup>a</sup>    | 9,5 $\pm$ 4,8 <sup>a</sup>   | 3,5 $\pm$ 1,5 <sup>a</sup>   |
| AggloGr + TM + Stroh  |  | 14,4 $\pm$ 0,1 <sup>b</sup>  | 4,0 $\pm$ 1,3 <sup>b</sup>                   | 16,0 $\pm$ 2,4 <sup>d</sup>   | 34,5 $\pm$ 3,0 <sup>a</sup>  | 34,8 $\pm$ 2,6 <sup>a</sup>    | 7,8 $\pm$ 3,0 <sup>a</sup>   | 3,0 $\pm$ 0,5 <sup>a</sup>   |
| AggloGr + KAS         |  | 15,0 $\pm$ 1,0 <sup>b</sup>  | 4,7 $\pm$ 1,3 <sup>b</sup>                   | 10,2 $\pm$ 1,7 <sup>bcd</sup> | 31,1 $\pm$ 3,2 <sup>a</sup>  | 40,8 $\pm$ 1,6 <sup>abc</sup>  | 10,3 $\pm$ 2,8 <sup>a</sup>  | 3,0 $\pm$ 0,9 <sup>a</sup>   |
| AggloGr + KAS + Ton   |  | 15,0 $\pm$ 0,3 <sup>b</sup>  | 2,8 $\pm$ 1,1 <sup>ab</sup>                  | 9,6 $\pm$ 1,9 <sup>bcd</sup>  | 28,2 $\pm$ 3,8 <sup>a</sup>  | 41,8 $\pm$ 3,8 <sup>abc</sup>  | 14,0 $\pm$ 2,9 <sup>a</sup>  | 3,6 $\pm$ 1,5 <sup>a</sup>   |
| AggloGr + KAS + Stroh |  | 15,7 $\pm$ 1,5 <sup>b</sup>  | 2,2 $\pm$ 2,6 <sup>ab</sup>                  | 6,3 $\pm$ 4,4 <sup>abc</sup>  | 19,0 $\pm$ 13,8 <sup>a</sup> | 34,6 $\pm$ 12,7 <sup>a</sup>   | 23,3 $\pm$ 16,0 <sup>a</sup> | 14,6 $\pm$ 16,0 <sup>a</sup> |
| Pellet2015            |  | 11,5 $\pm$ 0,5 <sup>a</sup>  | 0,4 $\pm$ 0,5 <sup>a</sup>                   | 1,8 $\pm$ 0,4 <sup>a</sup>    | 17,0 $\pm$ 5,1 <sup>a</sup>  | 65,7 $\pm$ 3,1 <sup>d</sup>    | 11,7 $\pm$ 2,8 <sup>a</sup>  | 3,5 $\pm$ 0,9 <sup>a</sup>   |
| KAS                   | 0                                      | 14,2 $\pm$ 0,7 <sup>b</sup>  | 3,0 $\pm$ 0,5 <sup>ab</sup>                  | 11,8 $\pm$ 1,8 <sup>cd</sup>  | 27,6 $\pm$ 2,3 <sup>a</sup>  | 42,9 $\pm$ 1,2 <sup>abc</sup>  | 11,9 $\pm$ 2,1 <sup>a</sup>  | 2,8 $\pm$ 0,5 <sup>a</sup>   |
| Kontrolle*            |  | 10,0 $\pm$ 2,0 <sup>a</sup>  | 0,6 $\pm$ 0,7 <sup>a</sup>                   | 5,0 $\pm$ 3,7 <sup>ab</sup>   | 28,8 $\pm$ 20,6 <sup>a</sup> | 55,3 $\pm$ 21,0 <sup>bcd</sup> | 8,8 $\pm$ 4,1 <sup>a</sup>   | 1,6 $\pm$ 1,0 <sup>a</sup>   |

Tabelle 35: Gehalte an N, P und K im Erntegut von Hafer im Gefäßversuch 2016. Daten dargestellt als Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung. Unterschiedliche Buchstaben innerhalb einer Spalte und Materialgruppe markieren signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen (Tukey's HSD Test,  $p \leq 0,05$ ). Bei Varianten markiert mit \* konnten nur drei Wiederholungen in die Auswertung einbezogen werden.

| Material |       | Variante              | N<br>(g Gefäß <sup>-1</sup> ) | N                           | P                            | K                             |
|----------|-------|-----------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|
|          |       |                       |                               | g kg <sup>-1</sup>          |                              |                               |
| Hafer    | Korn  | AggloGr*              |                               | 17,5 $\pm$ 2,0 <sup>a</sup> | 5,93 $\pm$ 0,25 <sup>a</sup> | 10,68 $\pm$ 0,62 <sup>a</sup> |
|          |       | AggloGr + TM          |                               | 24,9 $\pm$ 0,6 <sup>b</sup> | 5,42 $\pm$ 0,25 <sup>a</sup> | 10,29 $\pm$ 0,76 <sup>a</sup> |
|          |       | AggloGr + TM + Ton    |                               | 23,7 $\pm$ 0,2 <sup>b</sup> | 5,57 $\pm$ 0,35 <sup>a</sup> | 10,28 $\pm$ 0,43 <sup>a</sup> |
|          |       | AggloGr + TM + Stroh  |                               | 23,1 $\pm$ 0,2 <sup>b</sup> | 5,43 $\pm$ 0,45 <sup>a</sup> | 11,00 $\pm$ 1,65 <sup>a</sup> |
|          |       | AggloGr + KAS         | 3                             | 24,0 $\pm$ 1,6 <sup>b</sup> | 5,54 $\pm$ 0,21 <sup>a</sup> | 13,13 $\pm$ 0,99 <sup>a</sup> |
|          |       | AggloGr + KAS + Ton   |                               | 23,9 $\pm$ 0,5 <sup>b</sup> | 5,20 $\pm$ 0,49 <sup>a</sup> | 12,26 $\pm$ 1,18 <sup>a</sup> |
|          |       | AggloGr + KAS + Stroh |                               | 25,1 $\pm$ 2,4 <sup>b</sup> | 5,88 $\pm$ 0,53 <sup>a</sup> | 11,23 $\pm$ 2,01 <sup>a</sup> |
|          |       | Pellet2015            |                               | 18,4 $\pm$ 0,7 <sup>a</sup> | 4,56 $\pm$ 3,04 <sup>a</sup> | 8,53 $\pm$ 5,75 <sup>a</sup>  |
|          |       | KAS                   |                               | 22,8 $\pm$ 1,1 <sup>b</sup> | 5,07 $\pm$ 0,34 <sup>a</sup> | 12,14 $\pm$ 1,03 <sup>a</sup> |
|          |       | Kontrolle*            | 0                             | 16,0 $\pm$ 3,3 <sup>a</sup> | 5,40 $\pm$ 0,59 <sup>a</sup> | 8,18 $\pm$ 0,33 <sup>a</sup>  |
|          | Stroh | AggloGr*              |                               | 2,9 $\pm$ 1,6 <sup>a</sup>  | 4,39 $\pm$ 0,78 <sup>b</sup> | 36,66 $\pm$ 1,96 <sup>d</sup> |
|          |       | AggloGr + TM          |                               | 14,8 $\pm$ 0,4 <sup>d</sup> | 1,53 $\pm$ 0,26 <sup>a</sup> | 19,54 $\pm$ 1,03 <sup>b</sup> |
|          |       | AggloGr + TM + Ton    |                               | 10,5 $\pm$ 1,7 <sup>c</sup> | 1,45 $\pm$ 0,09 <sup>a</sup> | 19,06 $\pm$ 0,88 <sup>b</sup> |
|          |       | AggloGr + TM + Stroh  |                               | 13,6 $\pm$ 0,8 <sup>d</sup> | 1,57 $\pm$ 0,24 <sup>a</sup> | 19,31 $\pm$ 0,18 <sup>b</sup> |
|          |       | AggloGr + KAS         | 3                             | 19,5 $\pm$ 0,7 <sup>e</sup> | 1,22 $\pm$ 0,09 <sup>a</sup> | 16,00 $\pm$ 0,39 <sup>a</sup> |
|          |       | AggloGr + KAS + Ton   |                               | 18,7 $\pm$ 1,4 <sup>e</sup> | 1,42 $\pm$ 0,17 <sup>a</sup> | 15,79 $\pm$ 1,12 <sup>a</sup> |
|          |       | AggloGr + KAS + Stroh |                               | 20,0 $\pm$ 1,9 <sup>e</sup> | 1,48 $\pm$ 0,20 <sup>a</sup> | 15,38 $\pm$ 1,13 <sup>a</sup> |
|          |       | Pellet2015            |                               | 7,4 $\pm$ 1,1 <sup>b</sup>  | 7,60 $\pm$ 0,36 <sup>c</sup> | 37,07 $\pm$ 0,33 <sup>d</sup> |
|          |       | KAS                   |                               | 18,9 $\pm$ 1,0 <sup>e</sup> | 1,24 $\pm$ 0,17 <sup>a</sup> | 14,20 $\pm$ 0,95 <sup>a</sup> |
|          |       | Kontrolle*            | 0                             | 2,2 $\pm$ 1,2 <sup>a</sup>  | 4,41 $\pm$ 1,01 <sup>b</sup> | 31,98 $\pm$ 1,26 <sup>c</sup> |

Der Nährstoffentzug durch die Haferpflanzen sowie die Gegenüberstellung mit den ausgebrachten Nährstoffmengen sind in Tabelle 36 dargestellt. Bei Anwendung der gleichen Menge an Stickstoff (3 g je Gefäß) zeigten sich deutliche Unterschiede bei der N-Aufnahme durch die Pflanzen. Von dem durch AggloGr und Pellet2015 eingebrachten Stickstoff wurden rechnerisch nur 5 bzw. 7 % durch die Pflanzen aufgenommen. Von dem durch reinen KAS ausgebrachten Stickstoff wurden 56 % durch die Pflanzen aufgenommen. Nach Anwendung der Gärprodukte mit Tiermehl wurden zwischen 46 (AggloGr+TM+Ton) und 50 % (AggloGr+TM+Stroh) des ausgebrachten Stickstoffs durch die Pflanzen entzogen, nach Anwendung der Gärprodukte mit KAS rund 61 %. Damit war die N-Effizienz bei den Gärprodukten mit Tiermehl und denen mit Tiermehl und Ton signifikant geringer als die von reinem KAS, während die Gärprodukte mit KAS eine tendenziell etwas höhere N-Effizienz aufwiesen als reiner KAS.

Die durch die Zuschlagstoffe erhöhte Stickstoffverfügbarkeit führte zu steigenden Pflanzenerträgen. Gleichzeitig wurden die Gehalte an Phosphor und Kalium in den Gärprodukten reduziert. Dies führte dazu, dass in den Varianten mit Gärprodukten der Kategorie 2 die Bilanz für diese beiden Nährstoffe je Gefäß negativ ausfiel, d.h. dass für das Pflanzenwachstum dem Bodenvorrat Phosphor und Kalium entzogen wurde. Je geringer der Gehalt des jeweiligen Nährstoffs in den Gärprodukten war, desto negativer fiel die Bilanz aus. Nach Anwendung von AggloGr verblieben dagegen 82 % des ausgebrachten Phosphors und 75 % des ausgebrachten Kaliums im Boden. Bei den Pellets waren es 84 % des Phosphors und 83 % des Kaliums. Langfristig gesehen wäre bei Anwendung der Gärprodukte der Kategorie 2 eine Ausgleichsdüngung mit diesen Nährstoffen notwendig, um einem Verarmen des Bodens vorzubeugen.



Tabelle 36: Durch Gärprodukte ausgebrachte und durch Hafer entzogene Mengen von Stickstoff, Phosphor und Kalium im Gefäßversuch 2016. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer Spalte für das jeweilige Nährelement (Tukey's Test,  $p \leq 0,05$ ). Bei Varianten markiert mit \* konnten nur drei Wiederholungen ausgewertet werden.

| Nähr-<br>element | Gärprodukt und<br>Aufwandmenge | Ausge-<br>brachte<br>Menge<br>(g Gefäß <sup>-1</sup> ) | Entzug                    |                           |                                   |
|------------------|--------------------------------|--|---------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
|                  |                                |  | g Gefäß <sup>-1</sup>     |                           | % der ausge-<br>brachten<br>Menge |
|                  |                                |  | Korn                      | Stroh                     |                                   |
| Stickstoff       | AggloGr*                       | 3,00   | 0,17 ± 0,02 <sup>a</sup>  | 0,03 ± 0,02 <sup>a</sup>  | 6,70 ± 0,33 <sup>a</sup>          |
|                  | AggloGr + TM                   |  | 0,82 ± 0,01 <sup>b</sup>  | 0,59 ± 0,04 <sup>c</sup>  | 46,89 ± 1,73 <sup>b</sup>         |
|                  | AggloGr + TM + Ton             |  | 0,95 ± 0,05 <sup>b</sup>  | 0,43 ± 0,06 <sup>b</sup>  | 46,01 ± 1,88 <sup>b</sup>         |
|                  | AggloGr + TM + Stroh           |  | 0,91 ± 0,07 <sup>b</sup>  | 0,58 ± 0,03 <sup>c</sup>  | 49,60 ± 2,38 <sup>bc</sup>        |
|                  | AggloGr + KAS                  |  | 0,98 ± 0,05 <sup>b</sup>  | 0,84 ± 0,05 <sup>de</sup> | 60,62 ± 1,66 <sup>d</sup>         |
|                  | AggloGr + KAS + Ton            |  | 0,97 ± 0,11 <sup>b</sup>  | 0,85 ± 0,07 <sup>de</sup> | 60,62 ± 5,43 <sup>d</sup>         |
|                  | AggloGr + KAS + Stroh          |  | 0,95 ± 0,08 <sup>b</sup>  | 0,89 ± 0,08 <sup>e</sup>  | 61,54 ± 3,60 <sup>d</sup>         |
|                  | Pellet2015                     |  | 0,10 ± 0,01 <sup>a</sup>  | 0,06 ± 0,01 <sup>a</sup>  | 5,46 ± 0,59 <sup>a</sup>          |
|                  | KAS                            |  | 0,93 ± 0,11 <sup>b</sup>  | 0,76 ± 0,04 <sup>d</sup>  | 56,44 ± 4,97 <sup>cd</sup>        |
|                  | Kontrolle*                     | 0,00   | 0,07 ± 0,02 <sup>a</sup>  | 0,01 ± 0,01 <sup>a</sup>  | -                                 |
| Phosphor         | AggloGr*                       | 0,62   | 0,06 ± 0,01 <sup>a</sup>  | 0,05 ± 0,01 <sup>ab</sup> | 17,51 ± 0,74 <sup>a</sup>         |
|                  | AggloGr + TM                   | 0,11   | 0,18 ± 0,01 <sup>b</sup>  | 0,06 ± 0,01 <sup>bc</sup> | 217,93 ± 6,95 <sup>bc</sup>       |
|                  | AggloGr + TM + Ton             | 0,12   | 0,22 ± 0,02 <sup>b</sup>  | 0,06 ± 0,00 <sup>bc</sup> | 235,94 ± 21,74 <sup>c</sup>       |
|                  | AggloGr + TM + Stroh           | 0,12   | 0,21 ± 0,03 <sup>b</sup>  | 0,07 ± 0,01 <sup>c</sup>  | 234,57 ± 28,22 <sup>c</sup>       |
|                  | AggloGr + KAS                  | 0,13   | 0,23 ± 0,03 <sup>b</sup>  | 0,05 ± 0,00 <sup>bc</sup> | 215,20 ± 23,99 <sup>bc</sup>      |
|                  | AggloGr + KAS + Ton            | 0,08   | 0,21 ± 0,02 <sup>b</sup>  | 0,06 ± 0,00 <sup>bc</sup> | 342,11 ± 30,09 <sup>d</sup>       |
|                  | AggloGr + KAS + Stroh          | 0,17   | 0,22 ± 0,03 <sup>b</sup>  | 0,07 ± 0,01 <sup>bc</sup> | 171,44 ± 22,25 <sup>b</sup>       |
|                  | Pellet2015                     | 0,56   | 0,03 ± 0,00 <sup>a</sup>  | 0,06 ± 0,01 <sup>bc</sup> | 16,03 ± 2,26 <sup>a</sup>         |
|                  | KAS                            | 0,00   | 0,21 ± 0,02 <sup>b</sup>  | 0,05 ± 0,00 <sup>bc</sup> | -                                 |
|                  | Kontrolle*                     | 0,00   | 0,03 ± 0,01 <sup>a</sup>  | 0,03 ± 0,01 <sup>a</sup>  | -                                 |
| Kalium           | AggloGr*                       | 2,16   | 0,11 ± 0,02 <sup>a</sup>  | 0,42 ± 0,03 <sup>bc</sup> | 24,74 ± 2,15 <sup>a</sup>         |
|                  | AggloGr + TM                   | 0,45   | 0,34 ± 0,03 <sup>b</sup>  | 0,77 ± 0,09 <sup>e</sup>  | 247,80 ± 15,13 <sup>c</sup>       |
|                  | AggloGr + TM + Ton             | 0,51   | 0,41 ± 0,03 <sup>bc</sup> | 0,78 ± 0,04 <sup>e</sup>  | 234,63 ± 10,17 <sup>c</sup>       |
|                  | AggloGr + TM + Stroh           | 0,52   | 0,44 ± 0,09 <sup>bc</sup> | 0,82 ± 0,03 <sup>e</sup>  | 241,32 ± 13,69 <sup>c</sup>       |
|                  | AggloGr + KAS                  | 0,53   | 0,54 ± 0,09 <sup>c</sup>  | 0,69 ± 0,04 <sup>de</sup> | 231,88 ± 20,25 <sup>c</sup>       |
|                  | AggloGr + KAS + Ton            | 0,38   | 0,50 ± 0,06 <sup>bc</sup> | 0,72 ± 0,12 <sup>e</sup>  | 320,83 ± 42,62 <sup>d</sup>       |
|                  | AggloGr + KAS + Stroh          | 0,63   | 0,43 ± 0,12 <sup>bc</sup> | 0,69 ± 0,07 <sup>de</sup> | 177,96 ± 20,27 <sup>b</sup>       |
|                  | Pellet2015                     | 2,14   | 0,06 ± 0,00 <sup>a</sup>  | 0,31 ± 0,03 <sup>ab</sup> | 16,80 ± 1,06 <sup>a</sup>         |
|                  | KAS                            | 0,00   | 0,50 ± 0,05 <sup>bc</sup> | 0,57 ± 0,02 <sup>cd</sup> | -                                 |
|                  | Kontrolle*                     | 0,00   | 0,04 ± 0,02 <sup>a</sup>  | 0,22 ± 0,04 <sup>a</sup>  | -                                 |

Die Kohlenstoffgehalte und der pH-Wert des Bodens sind in Tabelle 37 dargestellt. Der Ausgangs-pH-Wert des Bodens war im Jahr 2016 mit 7,1 etwas höher als im Jahr 2015 (6,8). Ein signifikanter Anstieg auf 7,6 wurde durch Anwendung von AggloGr+TM und AggloGr+KAS+Ton bewirkt. Auch die Ausgangsgehalte am Gesamt- und heißwasserlöslichen Kohlenstoff waren 2016 höher als 2015. Während der  $C_{ges}$  nicht erhöht wurde, wurde durch AggloGr, Pellet2015 und alle Gärprodukte mit Tiermehl der Gehalt an  $C_{hwl}$  erhöht. Die Gehalte an organischem Kohlenstoff wurden nur tendenziell durch AggloGr und Pellet2015 erhöht, während die Anwendung von reinem KAS tendenziell zu einem Abbau des  $C_{org}$  führte. Die geringe Beeinflussung des Kohlenstoffgehalts durch die Gärprodukte der Kategorie 2 hat mehrere Ursachen: Da Stickstoff die Berechnungsgrundlage für die Aufwandmenge im Versuch war, musste von den Gärprodukten mit erhöhtem N-Gehalt eine deutlich geringere Menge ausgebracht werden, was die ausgebrachte Menge an reinem Gärrest entsprechend verringert hat. Die Gehalte an  $C_{org}$  waren zudem insbesondere in den Gärprodukten mit KAS um bis zu zwei Drittel geringer als in den Gärprodukten der Kategorie 1 (vergleiche Tabelle 3 und Tabelle 6) und die Gärprodukte der Kategorie 2 besaßen ein sehr enges C/N-Verhältnis zwischen 1,4 und 5,4, was zu einer schnellen Mineralisierung der organischen Verbindungen in diesen Produkten geführt haben dürfte.

Tabelle 37: Gehalte an Gesamt-, organischem und heißwasserlöslichem Kohlenstoff und pH-Werte des Bodens im Gefäßversuch mit Hafer im Jahr 2016. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer Spalte (Tukey's Test,  $p \leq 0,05$ ). Bei Varianten markiert mit \* konnten nur drei Wiederholungen in die Auswertung einbezogen werden.

| Probe-<br>nahme             | Variante              | N<br>(g Gefäß <sup>-1</sup> ) | C <sub>ges</sub>         | C <sub>org</sub>          | C <sub>hw</sub>             | pH-Wert                  |
|-----------------------------|-----------------------|-------------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------------|
|                             |                       |                               | % TM                     |                           | g kg <sup>-1</sup>          |                          |
| Boden vor Versuchsbeginn    |                       |                               | 1,87 ± 0,11 <sup>a</sup> | 1,03 ± 0,03 <sup>ab</sup> | 0,50 ± 0,04 <sup>a</sup>    | 7,1 ± 0,1 <sup>a</sup>   |
| Nach der Ernte von<br>Hafer | AggloGr*              | 3                             | 2,06 ± 0,13 <sup>a</sup> | 1,22 ± 0,07 <sup>b</sup>  | 0,69 ± 0,03 <sup>bcd</sup>  | 7,3 ± 0,0 <sup>abc</sup> |
|                             | AggloGr + TM          |                               | 1,90 ± 0,11 <sup>a</sup> | 1,06 ± 0,06 <sup>ab</sup> | 0,73 ± 0,06 <sup>cd</sup>   | 7,6 ± 0,1 <sup>c</sup>   |
|                             | AggloGr + TM + Ton    |                               | 1,95 ± 0,08 <sup>a</sup> | 1,06 ± 0,09 <sup>ab</sup> | 0,70 ± 0,06 <sup>bcd</sup>  | 7,5 ± 0,1 <sup>bc</sup>  |
|                             | AggloGr + TM + Stroh  |                               | 1,84 ± 0,13 <sup>a</sup> | 1,08 ± 0,08 <sup>ab</sup> | 0,80 ± 0,15 <sup>d</sup>    | 7,5 ± 0,1 <sup>bc</sup>  |
|                             | AggloGr + KAS         |                               | 2,00 ± 0,12 <sup>a</sup> | 1,17 ± 0,10 <sup>ab</sup> | 0,60 ± 0,06 <sup>abc</sup>  | 7,5 ± 0,2 <sup>abc</sup> |
|                             | AggloGr + KAS + Ton   |                               | 2,03 ± 0,11 <sup>a</sup> | 1,08 ± 0,02 <sup>ab</sup> | 0,64 ± 0,05 <sup>abcd</sup> | 7,6 ± 0,1 <sup>c</sup>   |
|                             | AggloGr + KAS + Stroh |                               | 2,05 ± 0,13 <sup>a</sup> | 1,16 ± 0,09 <sup>ab</sup> | 0,63 ± 0,08 <sup>abcd</sup> | 7,4 ± 0,2 <sup>abc</sup> |
|                             | Pellet2015            |                               | 2,07 ± 0,30 <sup>a</sup> | 1,25 ± 0,21 <sup>b</sup>  | 0,82 ± 0,08 <sup>d</sup>    | 7,3 ± 0,2 <sup>abc</sup> |
|                             | KAS                   |                               | 1,77 ± 0,10 <sup>a</sup> | 0,97 ± 0,04 <sup>a</sup>  | 0,54 ± 0,05 <sup>ab</sup>   | 7,4 ± 0,1 <sup>abc</sup> |
|                             | Kontrolle*            | 0                             | 1,75 ± 0,08 <sup>a</sup> | 1,09 ± 0,14 <sup>ab</sup> | 0,53 ± 0,06 <sup>ab</sup>   | 7,3 ± 0,1 <sup>ab</sup>  |

Es ist dementsprechend nicht überraschend, dass durch diese Produkte kein Anstieg der C<sub>ges</sub> und C<sub>org</sub>-Gehalte zu beobachten war. Tiermehl besteht im Unterschied zu KAS aus organischen Verbindungen und stellt somit selbst eine Quelle leicht abbaubaren Kohlenstoffs dar. Dies erklärt die unterschiedlich starke Beeinflussung der C<sub>hw</sub>-Gehalte durch die beiden Gärproduktgruppen mit Tiermehl bzw. KAS.

### Raps 2015

Bei Raps wurden die Pflanzen im Jahr 2015 in keiner Variante größer als 20 cm (Abbildung A 8) und entwickelten sich nur bis zum BBCH-Stadium 18. Die Blattgrünentwicklung verlief in der niedrigeren Aufwandmenge bei allen Varianten nahezu parallel zur Kontrolle (Abbildung 22).

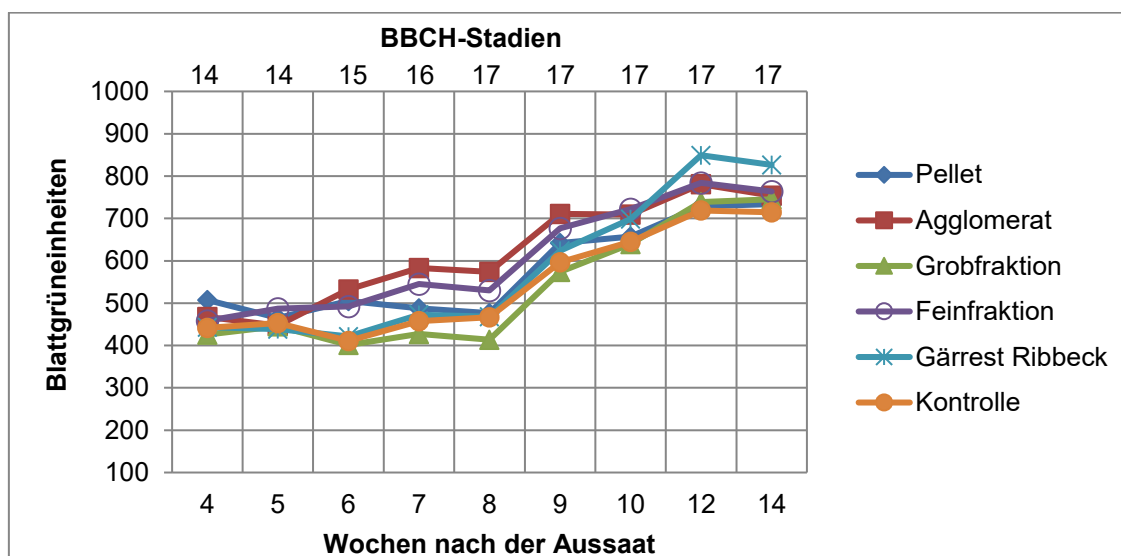


Abbildung 22: Entwicklung des Blattgrüns von Raps im Jahr 2015 in den Varianten mit 1 g Gefäß<sup>-1</sup> N

Dabei war ab der achten Woche bei allen Pflanzen ein deutlicher Anstieg des Blattgrüns zu verzeichnen. Im Zeitraum von sechs bis neun Wochen nach der Aussaat waren die mit Agglomeraten behandelten Pflanzen deutlich grüner als die Pflanzen der anderen Behandlungen. Am letzten

Boniturtermin, 14 Wochen nach der Aussaat, waren jedoch die mit Gärrest aus Ribbeck gedüngten Pflanzen signifikant (einfaktorielle ANOVA,  $p \leq 0,05$ ) grüner als alle anderen. Die Anwendung der höheren Aufwandmenge führte ab der sechsten Woche nach der Aussaat bei Agglomeraten und Feinfraction und ab der 10. Woche auch bei Gärrest aus Ribbeck zu erhöhten Blattgrün-Messwerten im Vergleich zu den Kontrollpflanzen (Abbildung 23). Zum letzten Boniturtermin waren die Pflanzen dieser drei Varianten signifikant grüner als die ungedüngten und die mit Grobfraction gedüngten Pflanzen.

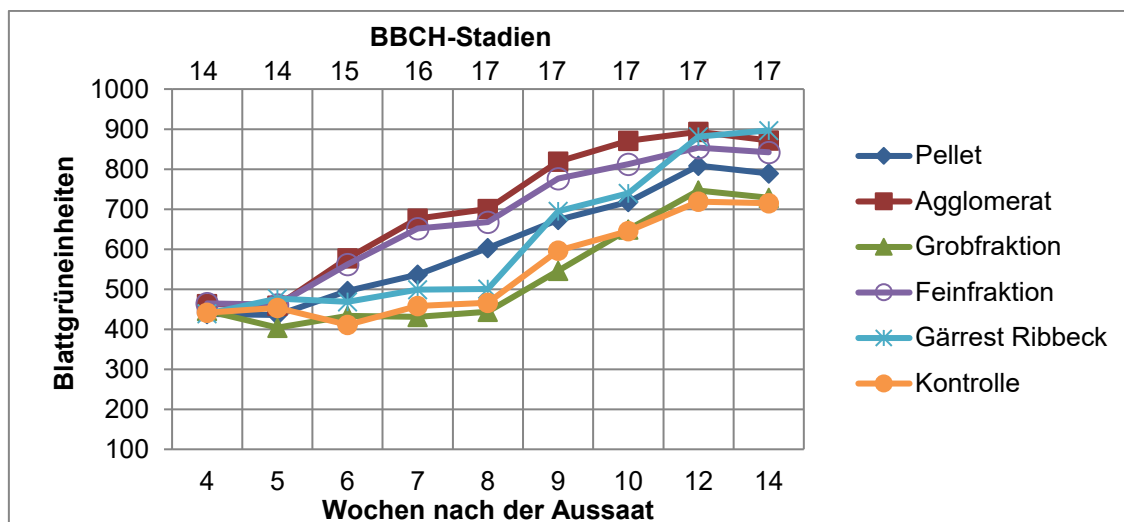


Abbildung 23: Entwicklung des Blattgrüns von Raps im Jahr 2015 in den Varianten mit 3 g Gefäß<sup>-1</sup> N

Da keine weitere Entwicklung der Pflanzen abzusehen war und diese zunehmend mit Blattverlust auf den Nährstoffmangel reagierten, wurde der Versuch mit Raps 14 Wochen nach der Aussaat beendet. Biomasseertrag und Blattfläche sind in Tabelle 38 dargestellt. Wie bereits aufgrund der geringen Wuchshöhe und der begrenzten Entwicklung der Pflanzen zu erwarten, waren die Biomasseerträge der Pflanzen niedrig. Bei einer Aufwandmenge entsprechend 1 g N Gefäß<sup>-1</sup> lieferten nur die Agglomerate und der Gärrest aus Ribbeck Erträge und Blattflächen, die statistisch signifikant höher bzw. größer waren als die der ungedüngten Kontrolle. In der höheren Aufwandmenge lieferten die Agglomerate (16,4 g Gefäß<sup>-1</sup>) und die Feinfraction (14,8 g), gefolgt vom Gärrest aus Ribbeck (12,2 g) die höchsten Erträge.

Tabelle 38: Biomasseertrag und Blattfläche von Raps im Gefäßversuch 2015. Daten dargestellt als Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer Spalte (Tukey's Test,  $p \leq 0,05$ ).

| Variante        | Stickstoff<br>(g Gefäß <sup>-1</sup> ) | Produktmenge<br>(g Gefäß <sup>-1</sup> ) | Biomasseertrag<br>(g Gefäß <sup>-1</sup> TM) | Blattfläche<br>(cm <sup>2</sup> Gefäß <sup>-1</sup> ) |
|-----------------|--|--|--|---|
| Feinfraction    | 1                                      | 54,7                                     | 8,9 $\pm$ 0,9 <sup>abc</sup>                 | 399 $\pm$ 37 <sup>ab</sup>                            |
|                 | 3                                      | 164,0                                    | 14,8 $\pm$ 0,5 <sup>f</sup>                  | 623 $\pm$ 17 <sup>cd</sup>                            |
| Agglomerat      | 1                                      | 65,2                                     | 11,5 $\pm$ 0,3 <sup>de</sup>                 | 454 $\pm$ 62 <sup>b</sup>                             |
|                 | 3                                      | 195,7                                    | 16,4 $\pm$ 1,3 <sup>f</sup>                  | 671 $\pm$ 48 <sup>d</sup>                             |
| Pellet          | 1                                      | 67,0                                     | 9,0 $\pm$ 0,9 <sup>abcd</sup>                | 432 $\pm$ 51 <sup>ab</sup>                            |
|                 | 3                                      | 201,0                                    | 11,2 $\pm$ 0,7 <sup>cde</sup>                | 494 $\pm$ 74 <sup>bc</sup>                            |
| Grobfraction    | 1                                      | 69,8                                     | 7,3 $\pm$ 1,1 <sup>ab</sup>                  | 401 $\pm$ 33 <sup>ab</sup>                            |
|                 | 3                                      | 209,3                                    | 7,1 $\pm$ 1,1 <sup>a</sup>                   | 436 $\pm$ 24 <sup>ab</sup>                            |
| Gärrest Ribbeck | 1                                      | 251,5                                    | 9,8 $\pm$ 1,0 <sup>bcd</sup>                 | 472 $\pm$ 67 <sup>b</sup>                             |
|                 | 3                                      | 754,4                                    | 12,1 $\pm$ 2,2 <sup>e</sup>                  | 656 $\pm$ 103 <sup>d</sup>                            |
| Kontrolle       | 0                                      | 0,0                                      | 6,8 $\pm$ 0,9 <sup>a</sup>                   | 312 $\pm$ 53 <sup>a</sup>                             |

Die mit hohen Aufwandmengen von Agglomeraten (671 cm<sup>2</sup>), Gärrest aus Ribbeck (656 cm<sup>2</sup>) und Feinfraktion (623 cm<sup>2</sup>) gedüngten Pflanzen besaßen auch die größten Blattflächen. Die niedrigsten Erträge wurden mit 6,8 g in den Kontrollgefäßen erzielt. Die mit Grobfraktion gedüngten Pflanzen erbrachten in keiner Aufwandmenge signifikant höhere Erträge oder größere Blattflächen als die der Kontrolle. Signifikante Unterschiede zwischen den Aufwandmengen wurden für den Biomasseertrag nur bei Agglomeraten und Feinfraktion verzeichnet, für die Blattfläche bei Agglomeraten, Feinfraktion und Gärrest aus Ribbeck.

Raps ist verglichen mit anderen Kulturarten eine Pflanze mit einem sehr hohen Nährstoffbedarf (Diepenbrock *et al.*, 2016). Wie Tabelle 39 zu entnehmen, wurden durch den Raps im Jahr 2015 nur zwischen 2 und 8 % des ausgebrachten Stickstoffs aufgenommen.

Tabelle 39: Durch Gärprodukte ausgebrachte und durch Raps entzogene Mengen von N, P und K im Gefäßversuch 2015. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer Spalte für das jeweilige Nährelement (Tukey's Test,  $p \leq 0,05$ ).

| Nähr-<br>element | Gärprodukt und Auf-<br>wandmenge | Ausgebrachte<br>Menge<br>(g Gefäß <sup>-1</sup> ) | Entzug                     |                                 |
|------------------|----------------------------------|---|----------------------------|---------------------------------|
|                  |                                  |   | g Gefäß <sup>-1</sup>      | % der aus-gebrach-<br>ten Menge |
| Stickstoff       | Feinfraktion (1 g N)             | 1,00  | 0,06 ± 0,00 <sup>ab</sup>  | 6,30 ± 0,18 <sup>d</sup>        |
|                  | Feinfraktion (3 g N)             | 3,00  | 0,10 ± 0,01 <sup>de</sup>  | 3,47 ± 0,23 <sup>bc</sup>       |
|                  | Agglomerat (1 g N)               | 1,00  | 0,08 ± 0,01 <sup>bc</sup>  | 7,96 ± 0,78 <sup>ef</sup>       |
|                  | Agglomerat (3 g N)               | 3,00  | 0,11 ± 0,01 <sup>ef</sup>  | 3,67 ± 0,26 <sup>bc</sup>       |
|                  | Pellet (1 g N)                   | 1,00  | 0,07 ± 0,00 <sup>abc</sup> | 6,86 ± 0,40 <sup>de</sup>       |
|                  | Pellet (3 g N)                   | 3,00  | 0,09 ± 0,01 <sup>cd</sup>  | 2,86 ± 0,35 <sup>ab</sup>       |
|                  | Grobfraktion (1 g N)             | 1,00  | 0,07 ± 0,01 <sup>abc</sup> | 6,50 ± 0,54 <sup>d</sup>        |
|                  | Grobfraktion (3 g N)             | 3,00  | 0,07 ± 0,00 <sup>abc</sup> | 2,21 ± 0,10 <sup>a</sup>        |
|                  | Gärrest Ribbeck (1 g N)          | 1,00  | 0,08 ± 0,01 <sup>bc</sup>  | 8,37 ± 0,96 <sup>f</sup>        |
|                  | Gärrest Ribbeck (3 g N)          | 3,00  | 0,13 ± 0,02 <sup>f</sup>   | 4,36 ± 0,64 <sup>c</sup>        |
|                  | Kontrolle                        | 0,00  | 0,05 ± 0,02 <sup>a</sup>   | -                               |
| Phosphor         | Feinfraktion (1 g N)             | 0,15  | 0,03 ± 0,00 <sup>a</sup>   | 20,83 ± 1,23 <sup>c</sup>       |
|                  | Feinfraktion (3 g N)             | 0,45  | 0,04 ± 0,00 <sup>ab</sup>  | 7,26 ± 4,90 <sup>ab</sup>       |
|                  | Agglomerat (1 g N)               | 0,20  | 0,04 ± 0,00 <sup>ab</sup>  | 18,75 ± 0,41 <sup>c</sup>       |
|                  | Agglomerat (3 g N)               | 0,60  | 0,04 ± 0,02 <sup>ab</sup>  | 6,00 ± 3,72 <sup>ab</sup>       |
|                  | Pellet (1 g N)                   | 0,19  | 0,03 ± 0,00 <sup>a</sup>   | 16,88 ± 1,76 <sup>c</sup>       |
|                  | Pellet (3 g N)                   | 0,58  | 0,04 ± 0,00 <sup>ab</sup>  | 6,72 ± 0,79 <sup>ab</sup>       |
|                  | Grobfraktion (1 g N)             | 0,24  | 0,03 ± 0,01 <sup>a</sup>   | 11,36 ± 0,88 <sup>b</sup>       |
|                  | Grobfraktion (3 g N)             | 0,72  | 0,03 ± 0,00 <sup>a</sup>   | 4,04 ± 0,55 <sup>a</sup>        |
|                  | Gärrest Ribbeck (1 g N)          | n.b.  | 0,04 ± 0,00 <sup>ab</sup>  | -                               |
|                  | Gärrest Ribbeck (3 g N)          | n.b.  | 0,05 ± 0,01 <sup>b</sup>   | -                               |
|                  | Kontrolle                        | 0,00  | 0,03 ± 0,00 <sup>a</sup>   | -                               |
| Kalium           | Feinfraktion (1 g N)             | 0,73  | 0,10 ± 0,02 <sup>abc</sup> | 13,86 ± 2,36 <sup>c</sup>       |
|                  | Feinfraktion (3 g N)             | 2,18  | 0,19 ± 0,01 <sup>c</sup>   | 6,55 ± 4,39 <sup>a</sup>        |
|                  | Agglomerat (1 g N)               | 0,92  | 0,12 ± 0,01 <sup>abc</sup> | 13,20 ± 1,17 <sup>c</sup>       |
|                  | Agglomerat (3 g N)               | 2,76  | 0,16 ± 0,10 <sup>abc</sup> | 5,75 ± 3,58 <sup>a</sup>        |
|                  | Pellet (1 g N)                   | 0,91  | 0,11 ± 0,02 <sup>abc</sup> | 12,28 ± 1,79 <sup>bc</sup>      |
|                  | Pellet (3 g N)                   | 2,73  | 0,19 ± 0,02 <sup>c</sup>   | 6,87 ± 0,65 <sup>ab</sup>       |
|                  | Grobfraktion (1 g N)             | 0,98  | 0,09 ± 0,02 <sup>ab</sup>  | 9,13 ± 1,82 <sup>abc</sup>      |
|                  | Grobfraktion (3 g N)             | 2,93  | 0,14 ± 0,03 <sup>bc</sup>  | 4,61 ± 0,91 <sup>a</sup>        |
|                  | Gärrest Ribbeck (1 g N)          | n.b.  | 0,11 ± 0,00 <sup>abc</sup> | -                               |
|                  | Gärrest Ribbeck (3 g N)          | n.b.  | 0,17 ± 0,06 <sup>abc</sup> | -                               |
|                  | Kontrolle                        | 0,00  | 0,08 ± 0,01 <sup>a</sup>   | -                               |

Vom ausgebrachten Phosphor wurden rechnerisch zwischen 4 (hohe Aufwandmenge Grobfraktion) und 21 % (niedrige Aufwandmenge Feinfraktion) durch die Pflanzen aufgenommen, vom ausgebrachten Kalium zwischen 5 (hohe Aufwandmenge Grobfraktion) und 14 % (niedrige Aufwandmenge Feinfraktion). Die Nährstoffmenge, welche aus den Gärprodukten verfügbar wurde, hat bei Raps offensichtlich nicht für eine normale Pflanzenentwicklung ausgereicht und zu den sehr geringen Biomasseerträgen geführt. Mitverantwortlich ist hierfür möglicherweise auch das unterschiedliche Wurzelsystem. Pflanzen mit homorhizem Wurzelsystem wie Hafer bilden vor allem in den oberen Zentimetern des Bodens ein dichteres Wurzelsystem aus als Pflanzen mit allorhizem Wurzelsystem wie Raps (Beuters, 2014). Eventuell war es dem Hafer deshalb eher möglich, die in den Gärprodukten punktuell im Wurzelraum verteilten Nährstoffe zu erschließen als dem Raps.

In Tabelle 40 sind die Gehalte an Stickstoff, Phosphor und Kalium in der Biomasse von Raps aufgeführt. Ortseifen und Lammel (2005) geben Richtwerte für die Nährstoffgehalte von Rapspflanzen zum Zeitpunkt der Blüte an. Demnach wären Gehalte von 40,0-54,0 g kg<sup>-1</sup> Stickstoff, 3,2-6,6 g kg<sup>-1</sup> Phosphor und 24,0-49,0 g kg<sup>-1</sup> Kalium für eine gute Ertragsbildung ausreichend. Diese für den konventionellen Anbau formulierten Richtwerte wurden im Jahr 2015 nur für Phosphor erreicht, für Kalium und insbesondere für Stickstoff jedoch weit unterschritten. Vielmehr entsprachen die Gehalte an diesen beiden Nährstoffen den Ergebnissen von Paulsen und Schochow (2007), die im Stroh von Sommerraps aus ökologischem Anbau Gehalte von 7,8 g kg<sup>-1</sup> Stickstoff und 10,4 g kg<sup>-1</sup> Kalium feststellten.

Tabelle 40: Gehalte an N, P und K bei Raps im Gefäßversuch 2015. Ergebnisse sind dargestellt als Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung. Unterschiedliche Buchstaben innerhalb einer Spalte markieren signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen (Tukey's HSD Test,  $p \leq 0,05$ ).

| Probe-nahme | Variante           | N<br>(g Gefäß <sup>-1</sup> ) | N                             | P                              | K                               |
|-------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
|             |                    |                               | g kg <sup>-1</sup>            |                                |                                 |
| Raps        | Feinfraktion       | 1                             | 7,1 $\pm$ 0,07 <sup>ab</sup>  | 3,51 $\pm$ 0,16 <sup>bc</sup>  | 11,29 $\pm$ 1,10 <sup>ab</sup>  |
|             |                    | 3                             | 7,0 $\pm$ 0,05 <sup>a</sup>   | 2,96 $\pm$ 0,24 <sup>ab</sup>  | 12,42 $\pm$ 1,14 <sup>ab</sup>  |
|             | Agglomerat         | 1                             | 6,9 $\pm$ 0,06 <sup>a</sup>   | 3,25 $\pm$ 0,05 <sup>ab</sup>  | 10,52 $\pm$ 0,74 <sup>a</sup>   |
|             |                    | 3                             | 6,7 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup>   | 2,24 $\pm$ 1,40 <sup>a</sup>   | 9,89 $\pm$ 6,18 <sup>a</sup>    |
|             | Pellet             | 1                             | 7,7 $\pm$ 0,07 <sup>abc</sup> | 3,57 $\pm$ 0,21 <sup>bc</sup>  | 12,42 $\pm$ 1,37 <sup>ab</sup>  |
|             |                    | 3                             | 7,5 $\pm$ 0,06 <sup>abc</sup> | 3,46 $\pm$ 0,22 <sup>abc</sup> | 16,68 $\pm$ 0,83 <sup>bc</sup>  |
|             | Grobfraktion       | 1                             | 9,0 $\pm$ 0,07 <sup>bc</sup>  | 3,77 $\pm$ 0,47 <sup>bc</sup>  | 12,52 $\pm$ 3,45 <sup>ab</sup>  |
|             |                    | 3                             | 9,5 $\pm$ 0,12 <sup>cd</sup>  | 4,13 $\pm$ 0,47 <sup>bc</sup>  | 18,99 $\pm$ 1,81 <sup>c</sup>   |
|             | Gärrest<br>Ribbeck | 1                             | 8,6 $\pm$ 0,02 <sup>abc</sup> | 4,04 $\pm$ 0,29 <sup>bc</sup>  | 10,95 $\pm$ 1,11 <sup>ab</sup>  |
|             |                    | 3                             | 10,9 $\pm$ 0,08 <sup>d</sup>  | 4,52 $\pm$ 0,46 <sup>c</sup>   | 14,24 $\pm$ 2,19 <sup>abc</sup> |
|             | Kontrolle          | 0                             | 8,2 $\pm$ 0,12 <sup>abc</sup> | 3,77 $\pm$ 0,38 <sup>bc</sup>  | 12,61 $\pm$ 1,74 <sup>ab</sup>  |

Der pH-Wert des Bodens stieg in allen Gefäßen um 0,5 bis 0,8 an (Tabelle 41). Der höchste Anstieg wurde durch die Anwendung der Pellets hervorgerufen, obwohl diese von allen Gärprodukten den geringsten pH-Wert besitzen (vergl. Kapitel 2, Tabelle 3). Die Unterschiede zwischen den Gefäßen waren jedoch ähnlich wie bei Hafer gering.

Die Kohlenstoffgehalte des Bodens stiegen während des Versuches in allen Gefäßen an. Vor allem beim Gesamtkohlenstoffgehalt und dem Gehalt an organischem Kohlenstoff war der Anstieg in den mit Gärprodukten behandelten Gefäßen deutlich größer als in den Kontrollgefäßen.

Tabelle 41: Gehalte an Gesamt-, organischem und heißwasserlöslichem Kohlenstoff und pH-Werte des Bodens im Gefäßversuch mit Raps im Jahr 2015.

| Probe-<br>nahme            | Variante           | N je Gefäß<br>(g) | C <sub>ges</sub> | C <sub>org</sub> | C <sub>hwl</sub>   | pH-Wert |
|----------------------------|--------------------|-------------------|------------------|------------------|--------------------|---------|
|                            |                    |                   | % TM             |                  | g kg <sup>-1</sup> |         |
| Boden vor Versuchsbeginn   |                    |                   | 1,55             | 1,06             | 0,09               | 6,8     |
| Nach der Ernte von<br>Raps | Feinfraktion       | 1                 | 2,14             | 2,13             | 0,19               | 7,4     |
|                            |                    | 3                 | 1,79             | 1,35             | 0,16               | 7,4     |
|                            | Agglomerat         | 1                 | 2,31             | 1,77             | 0,20               | 7,4     |
|                            |                    | 3                 | 1,99             | 1,19             | 0,15               | 7,4     |
|                            | Pellet             | 1                 | 3,01             | 2,19             | 0,32               | 7,6     |
|                            |                    | 3                 | 2,11             | 1,55             | 0,19               | 7,4     |
|                            | Grobfrak-<br>tion  | 1                 | 1,99             | 1,43             | 0,18               | 7,4     |
|                            |                    | 3                 | 1,90             | 1,18             | 0,16               | 7,4     |
|                            | Gärrest<br>Ribbeck | 1                 | 1,99             | 1,42             | 0,23               | 7,3     |
|                            |                    | 3                 | 1,99             | 1,37             | 0,18               | 7,3     |
|                            | Kontrolle          | 0                 | 1,72             | 1,13             | 0,16               | 7,4     |

Anders als beim Versuch mit Hafer war der Anstieg der drei Kohlenstofffraktionen jeweils bei einer Aufwandmenge entsprechend 1 g N je Gefäß höher als bei einer Aufwandmenge von 3 g N. Durch Raps wurde je Gefäß weniger Stickstoff entzogen als durch Hafer und die Menge des entzogenen Stickstoffs unterschied sich zwischen der niedrigen und der hohen Aufwandmenge nur unwesentlich. In den Gefäßen mit der hohen Aufwandmenge blieb also bei Raps mehr Stickstoff zurück, was, verglichen mit der niedrigen Aufwandmenge, zu einem stärkeren Abbau der Kohlenstoffverbindungen geführt hat. Der Gehalt an heißwasserlöslichem Kohlenstoff wurde durch die Anwendung der Gärprodukte verdoppelt bis verdreifacht, der Gehalt an organischem Kohlenstoff durch die Anwendung von Feinfraktion und Pellets mehr als verdoppelt. Die Ausbringung der Pellets führte in der niedrigeren Aufwandmenge ebenfalls nahezu zu einer Verdoppelung des Gesamtkohlenstoffgehaltes.

## Raps 2016

Ähnlich wie bei Hafer wurde auch bei Raps im Jahr 2016 durch die Zugabe verschiedener Zuschlagstoffe zu den Agglomeraten ein deutlicher Düngeeffekt erzielt, der zu einem normalen Entwicklungsverlauf der Rapspflanzen führte und sich in Wuchshöhe und Biomasseertrag zeigte (Abbildung 24).

Im Gegensatz zu den mit Gärprodukten der Kategorie 2 gedüngten Pflanzen stagnierten die mit Agglomeraten und Pellets der Kategorie 1 (Agglo2015 und Pellets2015) versorgten Pflanzen und die Pflanzen der Kontrolle in ihrer Entwicklung. Ab dem Erreichen des BBCH-Makrostadiums 3 in der fünften Woche nach der Aussaat gab es bei Agglo2015 und Kontrolle keine messbare Weiterentwicklung der Pflanzen mehr. Bei den Pellets war das Bild ähnlich, allerdings entwickelten einige der mit Pellet2015 gedüngten Pflanzen ca. 11 Wochen nach der Aussaat Blütenanlagen. Die verschiedenen Entwicklungsverläufe sind in den Diagrammen zu Wachstum und Blattgrünentwicklung gesondert dargestellt (Abbildung 25 und Abbildung 26). Entsprechend den unterschiedlichen Entwicklungsverläufen bildeten sich bei Wuchshöhe und Blattgrün ab der vierten Woche nach der Aussaat zwei Gruppen aus, wobei die erste Gruppe, bestehend aus Agglo2015,



Pellet2015 und Kontrolle, bis zur Ernte der Pflanzen nur eine maximale Wuchshöhe von rund 20 cm erreichte und durchweg niedrigere Blattgrünwerte aufwies als die zweite Gruppe.



Abbildung 24: Rapspflanzen jeweils ca. 11 Wochen nach der Aussaat im Gefäßversuch 2015 (oben, Varianten mit 3 g Gefäß<sup>-1</sup> N) und 2016 (unten, Varianten mit Gärprodukten der Kategorie 2) [Foto: Roß]

Zu dieser zweiten Gruppe zählten alle Gärprodukte der Kategorie 2 sowie die reine KAS-Düngung. Etwa ab der neunten Woche nach der Aussaat trat innerhalb dieser zweiten Gruppe eine weitere Differenzierung auf, die aber am letzten Boniturtermin zu keinen signifikanten Unterschieden zwischen den Varianten dieser Gruppe führte (einfaktorielle ANOVA,  $p \leq 0,05$ ). Die kleinsten Pflanzen dieser Gruppe wuchsen mit 105 cm in den mit AggloGr+KAS behandelten Gefäßen, die größten in den mit AggloGr+TM+Stroh behandelten Gefäßen (130 cm). Kontrolle, Agglo2015 und Pellet2015 wiesen von Beginn der Messungen an die geringsten Blattgrünwerte auf und zeigten kaum eine Veränderung über die Messperiode hinweg. Zum letzten Boniturtermin waren die Werte mit 511, 523 und 545 signifikant geringer als die der anderen Gärprodukte und der KAS-Variante (Abbildung 26). In der zweiten Gruppe zeigte sich ein leichter Anstieg der Messwerte bis

zum Beginn der Blüte. Die höchsten Werte wurden durch die Anwendung von AggloGr+KAS+Ton erzielt (696), die niedrigsten innerhalb dieser Gruppe durch AggloGr+TM+Stroh (634).

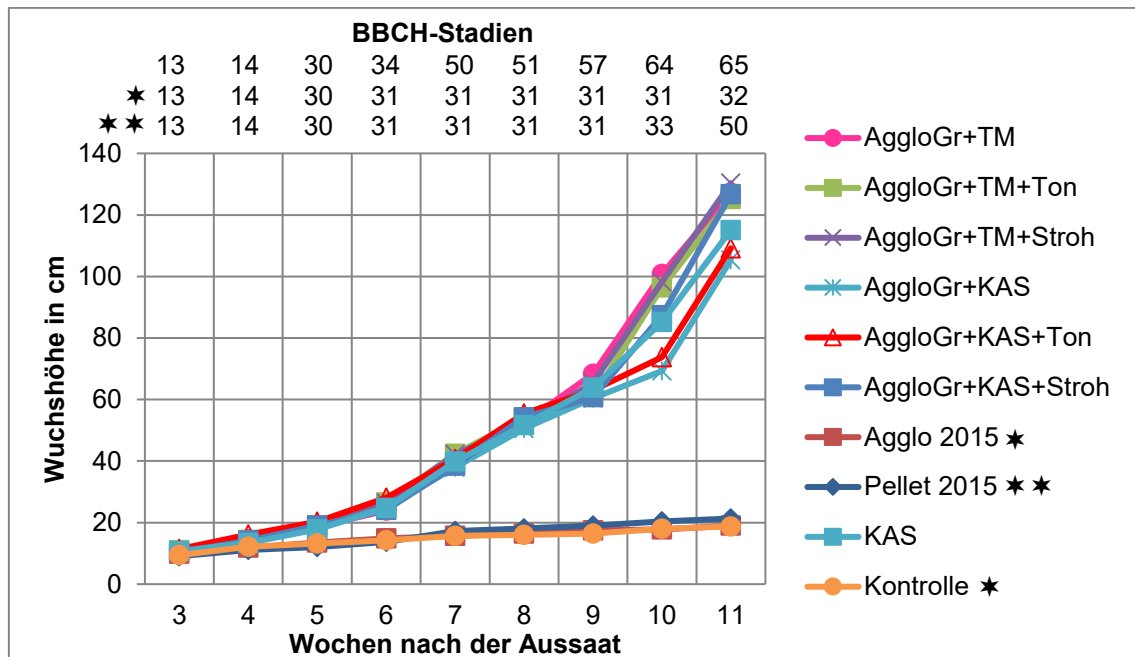


Abbildung 25: Entwicklung der Wuchshöhe bei Raps im Gefäßversuch 2016. Abweichende Entwicklungsverläufe der Varianten (BBCH-Stadien) sind durch \* markiert.

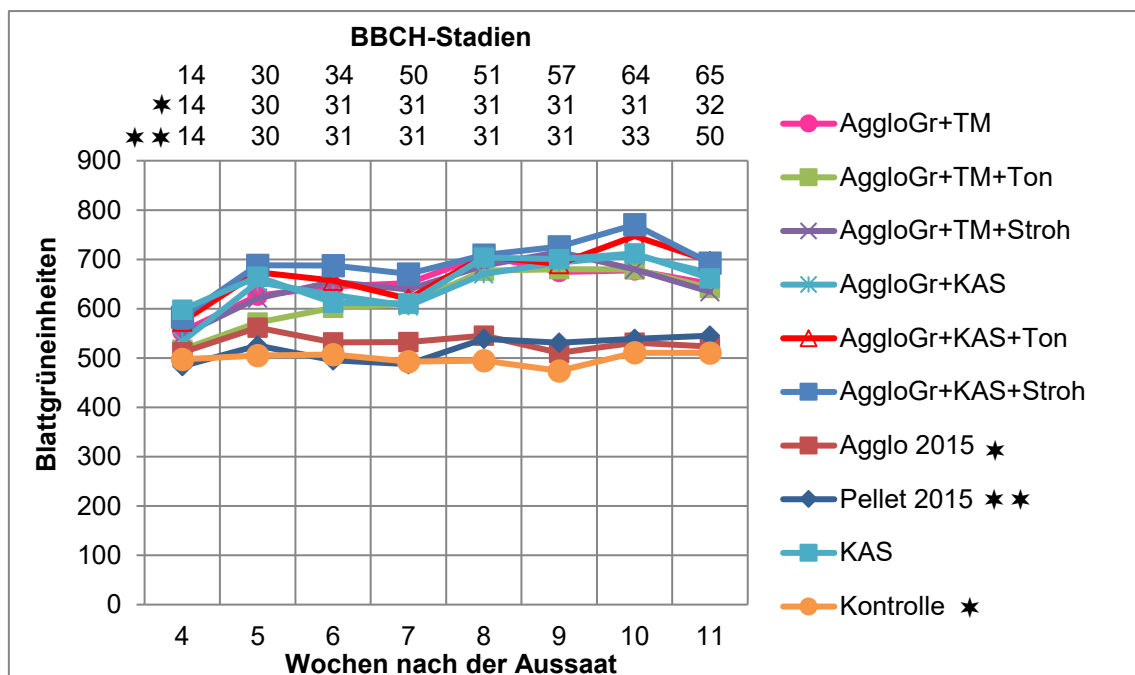


Abbildung 26: Entwicklung des Blattgrüns bei Raps im Gefäßversuch 2016. Abweichende Entwicklungsverläufe der Varianten (BBCH-Stadien) sind durch \* markiert.

Die Ernte wurde durchgeführt, als sich die besser entwickelten Pflanzen in der Mitte der Blüte befanden. Der Biomasseertrag ist in Tabelle 42 dargestellt. Mit rund 6, 7 bzw. 8 g je Gefäß erbrachten die Pflanzen der Kontrolle, der Agglo2015- und der Pellet2015-Variante die signifikant geringsten Erträge. Die Gärprodukte mit Tiermehl bildeten mit Erträgen zwischen 78,2 und 86,7 g eine eigene Gruppe. Mit 95,8 bis 101,2 g je Gefäß führte die Anwendung der Gärprodukte mit KAS sowie von KAS allein zu den signifikant höchsten Erträgen.



Tabelle 42: Biomasseertrag von Raps im Gefäßversuch 2016. Daten dargestellt als Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer Spalte (Tukey's Test,  $p \leq 0,05$ ).

| Variante              | Stickstoff<br>(g Gefäß <sup>-1</sup> ) | Produktmenge<br>(g Gefäß <sup>-1</sup> ) | Biomasseertrag je Gefäß<br>(g Gefäß <sup>-1</sup> TM) |
|-----------------------|--|--|---|
| AggloGr + TM          | 3                                      | 63,4                                     | 86,7 $\pm$ 5,7 <sup>b</sup>                           |
| AggloGr + TM + Ton    |  | 79,2                                     | 78,2 $\pm$ 3,8 <sup>b</sup>                           |
| AggloGr + TM + Stroh  |  | 60,0                                     | 84,0 $\pm$ 3,9 <sup>b</sup>                           |
| AggloGr + KAS         |  | 86,7                                     | 99,4 $\pm$ 4,9 <sup>c</sup>                           |
| AggloGr + KAS + Ton   |  | 81,8                                     | 101,2 $\pm$ 0,9 <sup>c</sup>                          |
| AggloGr + KAS + Stroh |  | 93,9                                     | 96,9 $\pm$ 5,7 <sup>c</sup>                           |
| Agglo2015             |  | 379,2                                    | 7,1 $\pm$ 0,3 <sup>a</sup>                            |
| Pellet2015            |  | 340,0                                    | 7,7 $\pm$ 1,0 <sup>a</sup>                            |
| KAS                   |  | 11,1                                     | 95,8 $\pm$ 3,4 <sup>c</sup>                           |
| Kontrolle             | 0                                      | 0,0                                      | 6,2 $\pm$ 0,3 <sup>a</sup>                            |

Die ausgebrachten und durch die Rapspflanzen entzogenen Nährstoffmengen sind in Tabelle 43 dargestellt. Bei Kontrolle, Agglo2015 und Pellet2015 war nicht genug Pflanzenmaterial vorhanden um Einzelanalysen der vier Wiederholungen durchzuführen.

Tabelle 43: Durch Gärprodukte ausgebrachte und durch Raps entzogene Mengen von Stickstoff, Phosphor und Kalium im Gefäßversuch 2016. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer Spalte für das jeweilige Nährelement (Tukey's Test,  $p \leq 0,05$ ).

| Nähr-<br>element | Gärprodukt und<br>Aufwandmenge | Ausgebrachte<br>Menge<br>(g Gefäß <sup>-1</sup> ) | Entzug                         |                                   |
|------------------|--------------------------------|---|--------------------------------|-----------------------------------|
|                  |                                |   | (g Gefäß <sup>-1</sup> )       | (% der aus-ge-<br>brachten Menge) |
| Stickstoff       | AggloGr + TM                   | 3,00  | 1,86 $\pm$ 0,41 <sup>a</sup>   | 62,14 $\pm$ 13,64 <sup>a</sup>    |
|                  | AggloGr + TM + Ton             |   | 1,55 $\pm$ 0,11 <sup>a</sup>   | 51,69 $\pm$ 3,77 <sup>a</sup>     |
|                  | AggloGr + TM + Stroh           |   | 1,81 $\pm$ 0,42 <sup>a</sup>   | 60,44 $\pm$ 13,96 <sup>a</sup>    |
|                  | AggloGr + KAS                  |   | 3,33 $\pm$ 0,22 <sup>b</sup>   | 111,10 $\pm$ 7,18 <sup>b</sup>    |
|                  | AggloGr + KAS + Ton            |   | 3,51 $\pm$ 0,43 <sup>b</sup>   | 116,86 $\pm$ 14,48 <sup>b</sup>   |
|                  | AggloGr + KAS + Stroh          |   | 3,63 $\pm$ 0,11 <sup>b</sup>   | 121,01 $\pm$ 18,68 <sup>b</sup>   |
|                  | Agglo2015                      |   | 0,06                           | 1,95                              |
|                  | Pellet2015                     |   | 0,08                           | 2,81                              |
|                  | KAS                            |   | 2,91 $\pm$ 0,21 <sup>b</sup>   | 97,02 $\pm$ 7,15 <sup>b</sup>     |
|                  | Kontrolle*                     | 0,00  | 0,05 <sup>a</sup>              | -                                 |
| Phosphor         | AggloGr + TM                   | 0,11  | 0,29 $\pm$ 0,02 <sup>abc</sup> | 266,21 $\pm$ 15,19 <sup>c</sup>   |
|                  | AggloGr + TM + Ton             | 0,12  | 0,25 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup>   | 207,94 $\pm$ 12,61 <sup>ab</sup>  |
|                  | AggloGr + TM + Stroh           | 0,12  | 0,28 $\pm$ 0,02 <sup>ab</sup>  | 232,99 $\pm$ 13,87 <sup>bc</sup>  |
|                  | AggloGr + KAS                  | 0,13  | 0,34 $\pm$ 0,03 <sup>cd</sup>  | 261,73 $\pm$ 20,18 <sup>c</sup>   |
|                  | AggloGr + KAS + Ton            | 0,08  | 0,35 $\pm$ 0,01 <sup>d</sup>   | 437,95 $\pm$ 17,88 <sup>d</sup>   |
|                  | AggloGr + KAS + Stroh          | 0,17  | 0,31 $\pm$ 0,04 <sup>bcd</sup> | 184,71 $\pm$ 23,69 <sup>a</sup>   |
|                  | Agglo2015                      | 0,66  | 0,03                           | 4,05                              |
|                  | Pellet2015                     | 0,56  | 0,03                           | 4,60                              |
|                  | KAS                            | 0,00  | 0,32 $\pm$ 0,01 <sup>bcd</sup> | -                                 |
|                  | Kontrolle*                     | 0,00  | 0,02 $\pm$ 0,01 <sup>a</sup>   | -                                 |
| Kalium           | AggloGr + TM                   | 0,45  | 1,53 $\pm$ 0,07 <sup>abc</sup> | 340,27 $\pm$ 15,30 <sup>c</sup>   |
|                  | AggloGr + TM + Ton             | 0,51  | 1,46 $\pm$ 0,12 <sup>ab</sup>  | 285,85 $\pm$ 24,23 <sup>ab</sup>  |
|                  | AggloGr + TM + Stroh           | 0,52  | 1,55 $\pm$ 0,08 <sup>abc</sup> | 297,46 $\pm$ 14,67 <sup>ab</sup>  |
|                  | AggloGr + KAS                  | 0,53  | 1,68 $\pm$ 0,13 <sup>bc</sup>  | 317,39 $\pm$ 24,87 <sup>bc</sup>  |
|                  | AggloGr + KAS + Ton            | 0,38  | 1,65 $\pm$ 0,02 <sup>bc</sup>  | 435,09 $\pm$ 4,81 <sup>d</sup>    |
|                  | AggloGr + KAS + Stroh          | 0,63  | 1,71 $\pm$ 0,14 <sup>c</sup>   | 271,32 $\pm$ 22,04 <sup>a</sup>   |
|                  | Agglo2015                      | 2,67  | 0,17                           | 6,33                              |
|                  | Pellet2015                     | 2,14  | 0,20                           | 9,17                              |
|                  | KAS                            | 0,00  | 1,35 $\pm$ 0,06 <sup>a</sup>   | -                                 |
|                  | Kontrolle*                     | 0,00  | 0,10                           | -                                 |

Eine statistische Auswertung dieser drei Varianten war deshalb nicht möglich. Die angegebenen Daten sind Mittelwerte aus Doppelbestimmungen. Die Nährstoffbilanz von Agglo2015 und Pellet2015 fiel für alle drei untersuchten Nährstoffe positiv aus. 97 (Pellet2015) bzw. 98 % (Agglo2015) des ausgebrachten Stickstoffs verblieben bei diesen beiden Varianten im Gefäß, 95 (Pellet2015) bzw. 96 % (Agglo2015) des Phosphors und 91 (Pellet2015) bzw. 94 % (Agglo2015) des Kaliums. Die N-Verfügbarkeit der anderen Gärprodukte unterschied sich in Abhängigkeit von der jeweiligen N-Quelle. Von dem Stickstoff, der durch die Tiermehl-Produkte in die Gefäße gelangte, wurden rein rechnerisch zwischen 38 (AggloGr+TM) und 48 % (AggloGr+TM+Ton) nicht durch die Pflanzen aufgenommen.

Die N-Bilanz der KAS-Produkte fiel negativ aus, d.h. es wurde zwischen 11 (AggloGr+KAS) und 21 % (AggloGr+KAS+Stroh) mehr Stickstoff entzogen als durch die jeweiligen Düngeprodukte ausgebracht wurde. Von dem durch KAS allein ausgebrachten Stickstoff verblieben dagegen rechnerisch ca. 3 % in den Gefäßen. Die Bilanzen für Phosphor und Kalium fielen aufgrund der bereits bei Hafer beschriebenen Reduktion der Gehalte dieser beiden Nährelemente in allen Varianten mit Gärprodukten der Kategorie 2 negativ aus, d.h. es wurden erhebliche Mengen dieser Nährstoffe aus dem Bodenvorrat mobilisiert. Die Phosphorgehalte bewegten sich dank dieser Entzüge aus dem Bodenvorrat im Jahr 2016 auf einem ähnlichen Niveau wie 2015, obwohl die ausgebrachten Mengen an diesem Nährstoff deutlich geringer waren (Tabelle 44). Die Kaliumgehalte waren trotz der reduzierten Zufuhr sogar höher als 2015. Die verbesserte Stickstoffversorgung der Pflanzen spiegelte sich in den Stickstoffgehalten wieder, die drei- bis fünffach höher waren als im Jahr 2016. Dabei waren die Gehalte der mit KAS-haltigen Produkten gedüngten Pflanzen signifikant höher als die der mit Tiermehl-Produkten versorgten Pflanzen.

Tabelle 44: Gehalte an Stickstoff, Phosphor und Kalium im Erntegut von Raps im Gefäßversuch 2016. Daten sind dargestellt als Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung, sofern eine ausreichende Anzahl Wiederholungen ausgewertet werden konnten. Unterschiedliche Buchstaben innerhalb einer Spalte markieren signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen (Tukey's HSD Test,  $p \leq 0,05$ ).

| Material        | Variante              | N<br>(g Gefäß <sup>-1</sup> ) | N                           | P                            | K                              |
|-----------------|-----------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------------|
|                 |                       |                               | g kg <sup>-1</sup>          |                              |                                |
| Raps (Biomasse) | AggloGr + TM          | 3                             | 21,6 $\pm$ 5,2 <sup>a</sup> | 3,38 $\pm$ 0,22 <sup>a</sup> | 17,67 $\pm$ 0,54 <sup>bc</sup> |
|                 | AggloGr + TM + Ton    |                               | 19,9 $\pm$ 1,9 <sup>a</sup> | 3,19 $\pm$ 0,14 <sup>a</sup> | 18,63 $\pm$ 0,91 <sup>c</sup>  |
|                 | AggloGr + TM + Stroh  |                               | 21,5 $\pm$ 4,5 <sup>a</sup> | 3,33 $\pm$ 0,13 <sup>a</sup> | 18,42 $\pm$ 1,04 <sup>c</sup>  |
|                 | AggloGr + KAS         |                               | 33,6 $\pm$ 2,0 <sup>b</sup> | 3,42 $\pm$ 0,16 <sup>a</sup> | 16,93 $\pm$ 1,20 <sup>bc</sup> |
|                 | AggloGr + KAS + Ton   |                               | 34,6 $\pm$ 4,1 <sup>b</sup> | 3,46 $\pm$ 0,14 <sup>a</sup> | 16,34 $\pm$ 0,29 <sup>b</sup>  |
|                 | AggloGr + KAS + Stroh |                               | 37,3 $\pm$ 3,5 <sup>b</sup> | 3,23 $\pm$ 0,24 <sup>a</sup> | 17,64 $\pm$ 0,52 <sup>bc</sup> |
|                 | Agglo2015             |                               | 8,3                         | 3,76                         | 23,80                          |
|                 | Pellet2015            |                               | 10,9                        | 3,34                         | 25,48                          |
|                 | KAS                   |                               | 30,4 $\pm$ 2,9 <sup>b</sup> | 3,36 $\pm$ 0,03 <sup>a</sup> | 14,12 $\pm$ 0,78 <sup>a</sup>  |
|                 | Kontrolle             | 0                             | 7,8                         | 2,94                         | 16,32                          |

In Tabelle A5 sind die Kohlenstoffgehalte und pH-Werte des Bodens dargestellt. Die pH-Werte stiegen, ausgehend von einem schon hohen Ausgangswert von 7,2, in allen Gefäßen tendenziell und in der Variante AggloGr+KAS auch signifikant an. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Varianten waren jedoch marginal. Die Gesamt-Kohlenstoffgehalte des Bodens stiegen während des Versuches in allen Gefäßen tendenziell an. Signifikant wurden sie aber nur durch Pellet2015 erhöht. Ähnlich stellt es sich bei den Gehalten an organischem Kohlenstoff dar, wo

nur Agglo2015 und Pellet2015 zu signifikanten Erhöhungen führten. Damit bestätigten sich bei Raps, was auch schon bei Hafer beobachtet wurde: Die Zugabe der Stickstoffquellen und die damit reduzierten Anteile an Gärrest führen zu geringeren Anteilen an Kohlenstoff und einem engeren C/N-Verhältnis im Ausgangsprodukt, was wiederum dazu führt, dass zwar die Düngewirkung der Produkte deutlich steigt, der positive Effekt auf die organische Bodensubstanz, den die Gärprodukte der Kategorie 1 besaßen, jedoch ausbleibt. Die Gehalte an heißwasserlöslichem Kohlenstoff stiegen in allen Gefäßen signifikant an, auch in der Kontrolle. Gegenüber dieser führten die Varianten AggloGr+TM, AggloGr+TM+Stroh und Pellet2015 zu einer weiteren signifikanten Steigerung.

### 3.5.4 Schlussfolgerungen

Zusammenfassend lassen sich aus den Gefäßversuchen folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Die Gärprodukte der Kategorie 1 besitzen zumindest in den ersten Monaten nach der Anwendung nur einen sehr geringen Düngeeffekt, was auf die geringen Gehalte an Stickstoff und auf die geringe Verfügbarkeit der enthaltenen Nährstoffe zurückzuführen ist. Nur maximal 12 % des ausgebrachten Stickstoffs, 43 % des ausgebrachten Phosphors und 34 % des ausgebrachten Kaliums wurden durch die Pflanzen aufgenommen.
- Die geringe Stickstoffverfügbarkeit führt zur Anreicherung des Bodens mit organischen Stickstoffverbindungen, die in den folgenden Jahren mineralisiert und damit pflanzenverfügbar gemacht werden können. Dies birgt ein nicht unerhebliches Einsparungspotential an Mineraldüngern (Scherer *et al.*, 2008).
- Unter Einbeziehung aller Ertrags- und Qualitätsparameter erwiesen sich die Agglomerate als am ehesten geeignete Aufbereitungsmethode, sofern ein Düngeprodukt das Ziel der Entwicklung ist.
- Phytotoxische Wirkungen oder eine mechanische Behinderung der Wurzelentwicklung, verursacht durch Störstoffe im Ausgangsmaterial, sind nicht auszuschließen. Die wenig aufbereitete Grobfraction führte zu niedrigeren Erträgen als durch die Pflanzen der ungedüngten Kontrolle erzielt wurden.
- Positiv zu bewerten sind die hohen Gehalte an Kalium und Phosphor in den Gärprodukten der Kategorie 1, sowie die hohen Gehalte an Kohlenstoffverbindungen. Die Anwendung der Gärprodukte kann den Aufbau eines langsam pflanzenverfügbar werdenden Nährstoffpools und langfristig gesehen den Erhalt bzw. die Vermehrung der organischen Substanz im Boden ermöglichen. Durch die Anwendung der Gärprodukte wurden die Gehalte an  $C_{ges}$ ,  $C_{org}$  und  $C_{hwl}$  im Boden angehoben. Die Höhe dieses Anstiegs hängt jedoch von verschiedenen Faktoren ab: Agglomeratbildung und Pelletierung verringerten den Anstieg im Versuch mit Hafer, nicht aber bei Raps. Die Pflanzenart, deren Durchwurzelungsvermögen und Nährstoffentzüge beeinflussen Zerfall und Mineralisierung der Produkte.
- Die Zugabe verschiedener Stickstoff-Quellen verändert die Zusammensetzung der Produkte, beschleunigt die Mineralisierung, erhöht die Nährstoffverfügbarkeit und steigert

damit die unmittelbare Düngewirkung erheblich. Die Kornerträge von Hafer wurden im Versuch durch alle Gärprodukte der Kategorie 2 vervierfacht. Bei Raps wurde eine normale Pflanzenentwicklung ermöglicht. Hinsichtlich des Korn- bzw. Biomasseertrages wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gärprodukten mit KAS und Tiermehl festgestellt. Bei Raps waren die Nährstoff- und insbesondere die Stickstoffgehalte des Pflanzenmaterials jedoch bei den Produkten mit Tiermehl deutlich geringer als bei den Produkten mit KAS, was sich in unterschiedlichen Kornerträgen niederschlagen könnte.

- Die Zugabe von Stickstoffquellen verringert zwangsläufig die Menge an Gärrest im Endprodukt, was zu geringeren Phosphor- und Kaliumgehalten führt. Bei gleichen N-Mengen werden die ausgebrachten Mengen an diesen beiden Nährstoffen um mehr als 80 % verringert. Wenn die Gehalte an diesen beiden Nährstoffen im Boden nicht verringert werden sollen, ist eine Ergänzungsdüngung erforderlich.
- Durch die veränderte Zusammensetzung der Produkte wird die Menge an Kohlenstoffverbindungen, die pro Einheit Stickstoff ausgebracht wird, deutlich reduziert. Dies verringert die Humusreproduktionsleistung der Gärprodukte erheblich. Hersteller und Landwirte müssen entscheiden, ob das Ziel der Gärprodukt-Anwendung die Erhöhung der Humusgehalte im Boden oder die unmittelbare Steigerung der Nährstoffversorgung der Pflanzen ist. Soll ein Düngeprodukt entwickelt werden, so ist die Zugabe von Nährstoffquellen empfehlenswert. Sollen große Mengen an Gärresten ökologisch sinnvoll verwertet und entsorgt werden und steht der Erhalt oder die Vermehrung der organischen Substanz im Boden im Vordergrund, so ist darauf zu verzichten.

### 3.6. Ackerbauliche Wirkungen im Freiland

*Die Inhalte dieses Kapitels wurden zum Teil veröffentlicht in „Setting the course for a biobased economy – Proceedings of the 24th European Biomass Conference in Amsterdam“ unter dem Titel „Heavy Metal Distribution in Soil and Crops after Agricultural Application of Biowaste-Based Digestates“.*

#### 3.6.1 Zielstellung

Gärprodukte und Komposte können die Bodenfruchtbarkeit fördern, indem sie Nährstoffe bereitstellen, organische Substanz liefern oder den pH-Wert beeinflussen (Scherer *et al.*, 2008; Vanden Nest *et al.*, 2014; Kirsch, 2002). Die Applikation derartiger organischer Düngemittel bzw. Bodenhilfsstoffe beeinflusst somit die chemischen, biologischen und physikalischen Eigenschaften von landwirtschaftlichen Böden. Aus den bisher beschriebenen Versuchen wird deutlich, dass die Mineralisierung der Gärprodukte nur langsam verläuft und Auswirkungen auf die Bodeneigenschaften deshalb langfristig beobachtet werden müssen. Veränderungen der Gehalte an organischer Substanz können aufgrund der hohen Variabilität und Abhängigkeit von Witterungsbedingungen und ackerbaulichen Maßnahmen ohnehin nur über einen mehrjährigen Zeitraum hinweg bewertet werden (Beerbaum, 2003). Auch im Hinblick auf die Nährstoffverfügbarkeit lassen sich zuverlässige und auf die Praxis übertragbare Aussagen nur auf Basis mehrjähriger Feldversuche treffen, während kurzfristige Gefäßversuche nur erste Anhaltspunkte liefern können (Möller-Arnold und Feichtinger, 1929). Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Feldversuch angelegt, in dem über drei Jahre nicht nur Erträge, sondern auch die Entwicklung ausgewählter bodenchemischer und -biologischer Parameter untersucht wurden. Die Entwicklung der bodenphysikalischen Parameter wurde ebenfalls untersucht, allerdings innerhalb eines anderen Teilprojektes. Die Ergebnisse sind deshalb nicht Bestandteil dieser Arbeit.

#### Schwermetalle

Gärreste bzw. Komposte aus Bioabfällen können z.B. aufgrund von Verunreinigungen mit Boden oder durch Kontamination mit Abfällen anderer Art eine Quelle für Schwermetalle sein (vergleiche auch Kapitel 2).

Ein linearer Zusammenhang zwischen den Gehalten an Schwermetallen im Boden und in den dort wachsenden Pflanzen ist selten zu beobachten, weil das Aufnahmeverhalten zwischen verschiedenen Pflanzenarten variiert und die Standortbedingungen die Pflanzenverfügbarkeit der Schwermetalle erheblich beeinflusst (Chojnacka *et al.*, 2005; Meers *et al.*, 2007). Oft besteht aber eine enge Verbindung zwischen beiden. So ist zum Beispiel die Cadmiumkonzentration in einzelnen Pflanzenorganen zum einen von den Cadmiumgehalten in der applizierten Nährstofflösung bzw. den angewendeten Kompostprodukten abhängig (Ciecko *et al.*, 2001; Wójcik und Tukiendorf, 2005). Zum anderen kann sie aber auch vom Salzgehalt und pH-Wert des Bodens oder durch Zinkmangel der Pflanze beeinflusst werden (Smolders, 2001). Die Verfügbarkeit von

Schwermetallen hängt grundsätzlich von vielen verschiedenen chemischen (z.B. pH-Wert, Vorhandensein von Eisen- und Manganoxiden, Spezierung) und physikalischen (z.B. Struktur, Durchwurzelbarkeit) Parametern des Bodens ab und kann bis zu einem bestimmten Grad auch durch die Abgabe von Sauerstoff, Protonen oder organischen Säuren durch die Pflanzen selbst beeinflusst werden (Ernst, 1996; Narwal *et al.*, 1999; Jung, 2008).

Nachdem im Oktober 2014 in den Gärprodukten zum ersten Mal deutliche Überschreitungen der gesetzlichen Grenzwerte für bestimmte Schwermetalle (Cadmium, Chrom, Kupfer und Blei) gemessen wurden, sind im Feldversuch bei allen folgenden Kulturen sowohl Boden- als auch Pflanzenmaterial auf diese vier Schwermetalle untersucht worden. Ziel war es, einen möglichen Anstieg der Gehalte im Boden sowie die Aufnahme durch die verschiedenen Pflanzenarten zu dokumentieren, um damit verbundene Risiken abschätzen zu können.

### 3.6.2 Material und Methoden

Der Feldversuch wurde in Berge (Kreis Havelland, Brandenburg) auf der landwirtschaftlichen Versuchsstation des Instituts für Agrar- und Stadtökologische Projekte (IASP) durchgeführt (Land Brandenburg; 52° 37' 12" N, 12° 47' 42" E, Abbildung 27).

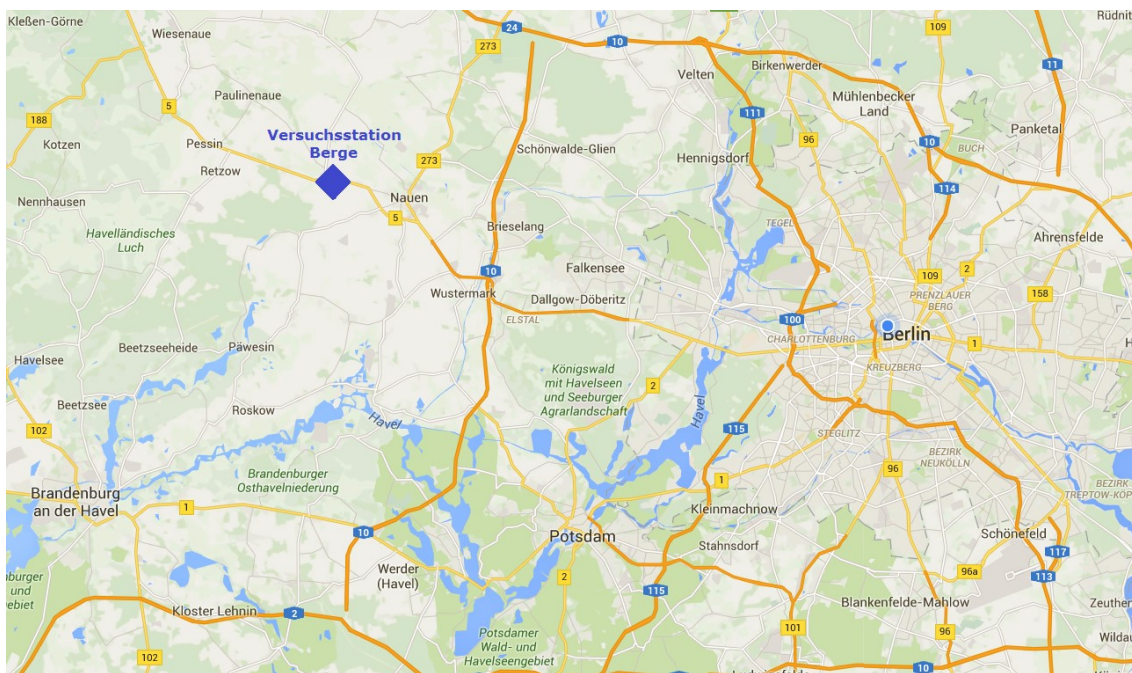


Abbildung 27: Lage der Versuchsstation des IASP in Berge bei Nauen (Google Maps, 2016)

#### Standortbedingungen

Beim Boden auf der Versuchsfläche handelt es sich um schwach bis mittel sandigen Lehm bzw. um mittel lehmigen Sand, die als Hauptbodenform eine Braun- bzw. Parabraunerde bilden. Die Jahresdurchschnittstemperatur beträgt 9,5 °C und der mittlere jährliche Niederschlag 517 mm.

In Abbildung 28 und Abbildung 29 sind die Monatsmitteltemperaturen und die monatlichen Niederschlagshöhen in den drei Versuchsjahren im Vergleich zum langjährigen Mittel dargestellt.

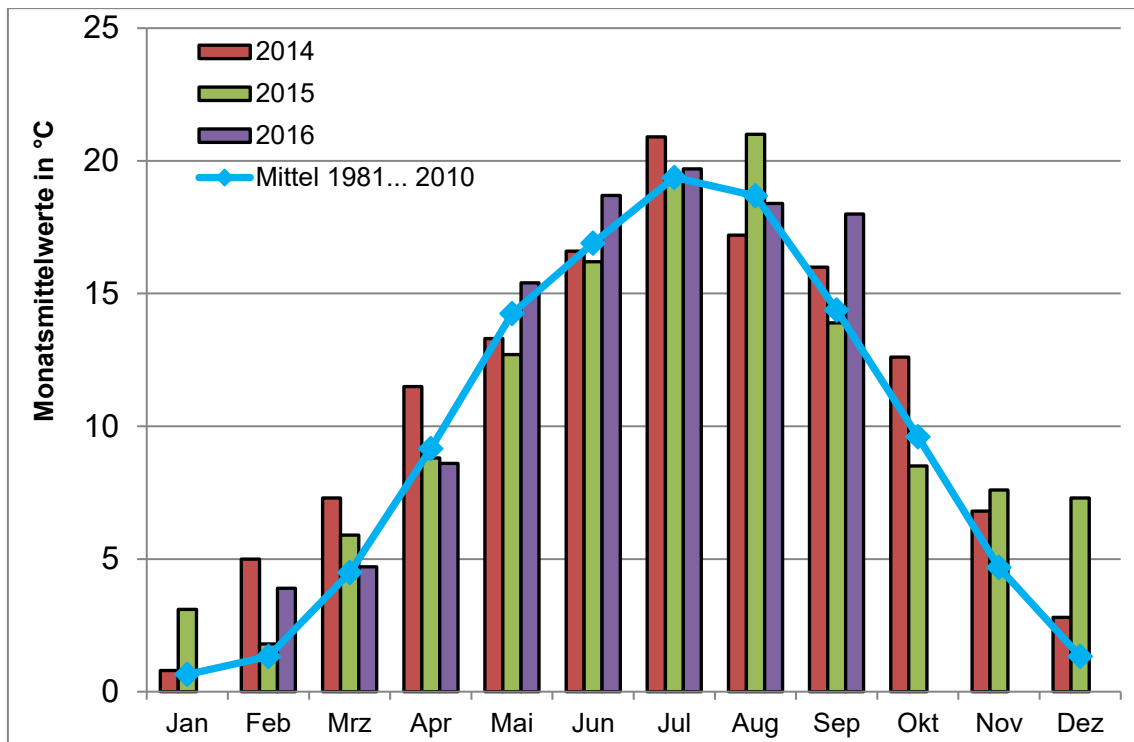


Abbildung 28: Temperaturen (Monatsmittelwerte) in den Versuchsjahren 2014 bis 2016 im Vergleich zum langjährigen Mittel am Standort Berge

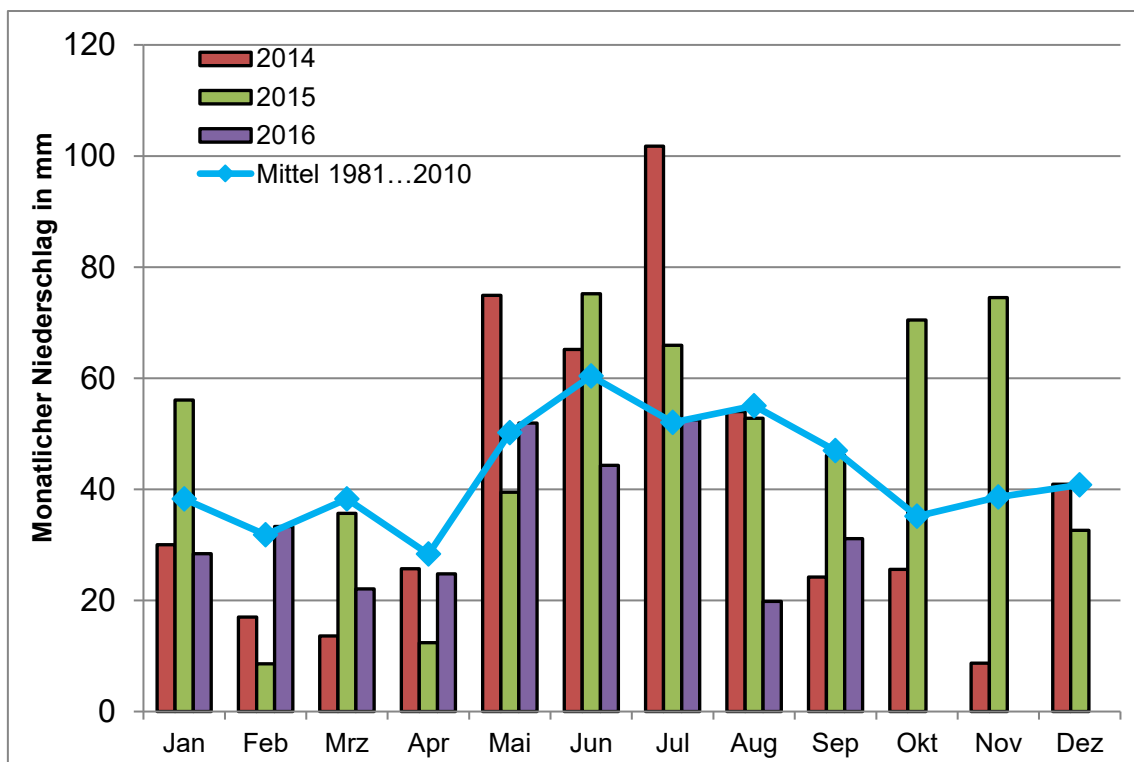


Abbildung 29: Monatliche Niederschlagshöhen in den Versuchsjahren 2014 bis 2016 im Vergleich zum langjährigen Mittel am Standort Berge

#### Versuchsanlage und Versuchsdurchführung

Bei dem Feldversuch handelt es sich um einen einfaktoriellen Versuch mit zwölf Prüfgliedern in vier Wiederholungen, der als Blockanlage mit vollständiger Randomisierung innerhalb der Blöcke

angelegt wurde. Der Versuch wurde mit den Gärprodukten der Kategorie 1 durchgeführt. Angebaut und untersucht wurden folgende Kulturen:

1. Gelbsenf (*Sinapis alba* L.): Aussaat am 20.08.2014, Ernte am 13.10.2014
2. Winterroggen (*Secale cereale* L.): Aussaat am 24.10.2014, Ernte am 05.05.2015
3. Silomais (*Zea mays* L.): Aussaat am 15.05.2015, Ernte am 01.10.2015
4. Winterweizen (*Triticum aestivum* L.): Aussaat am 26.10.2015, Ernte am 26.07.2016

Die Ausbringung der Gärprodukte erfolgte jeweils im Frühsommer und Herbst zu den entsprechenden Kulturen. Insgesamt gab es also vier Ausbringungen.

Der Feldversuch war zunächst als Stickstoffdüngerversuch geplant (siehe dazu auch Kapitel 2) und die Ausbringung der zu testenden Produkte am N-Gehalt orientiert. Insgesamt umfasste der Versuch neben einer ungedüngten Kontrolle und drei mit KAS gedüngten Varianten (30, 60 und 120 kg ha<sup>-1</sup> N) für jedes der vier Gärprodukte zwei Varianten: In der niedrigen Aufwandmenge wurden 100 kg ha<sup>-1</sup> N aus dem Gärprodukt ausgebracht und mit KAS ergänzt, so dass insgesamt 120 kg ha<sup>-1</sup> N in pflanzenverfügbarer Form ausgebracht wurden. In der hohen Aufwandmenge wurden 200 kg ha<sup>-1</sup> N ausschließlich aus dem jeweiligen Gärprodukt ausgebracht. Dies war der ursprünglichen Projektidee geschuldet, nach der im Verlauf des Forschungsvorhabens potentielle Stickstoffdünger auf der Basis von Gärresten aus der Bioabfallvergärung entwickelt werden sollten. Aufgrund der ersten Versuchsergebnisse und der ausführlichen Analysen der von den Projektpartnern entwickelten Produkte wurde im ersten Versuchsjahr deutlich, dass dieses Ziel ohne die Beimengung zusätzlicher Stickstoffquellen nicht erreicht werden könnte. Während für andere Versuchsreihen eine Weiterentwicklung der ursprünglichen Produkte angestrebt wurde (Gärprodukte der Kategorie 2), sollte im Feldversuch der Fokus auf die langfristige Wirkung der Bioabfallgärprodukte auf die Bodenfruchtbarkeit und die Ertragsfähigkeit gelegt werden. Die Gärprodukte der Kategorie 1 wurden eher als Bodenhilfsstoffe und weniger als Nährstoffdünger betrachtet und der Feldversuch angepasst. Ab dem zweiten Versuchsjahr (zu Mais) wurde deshalb die zusätzliche KAS-Düngung in den Varianten mit 100 kg ha<sup>-1</sup> N abgesetzt und die Ausbringung der Gärprodukte an der Trockenmasse ausgerichtet, was dadurch erleichtert wurde, dass durch die bisherigen Ausbringungen jeweils ungefähr 5 t ha<sup>-1</sup> TM in der niedrigen und 10 t ha<sup>-1</sup> TM in der hohen Aufwandstufe eingesetzt wurden. Diese Aufwandmengen konnten so einfach weitergeführt werden, ohne dass sich die ausgebrachten Mengen wesentlich geändert hätten.

Die Prüfglieder sind in Tabelle 45 aufgelistet. Der genaue Versuchsplan findet sich in Abbildung A 10.

Nach zwei Ausbringungen im Jahr 2014 und zwei weiteren Ausbringungen im Jahr 2015 wurden in den hohen Aufwandstufen insgesamt über 40 t ha<sup>-1</sup> TM ausgebracht, was nicht den vorgeschriebenen Grenzen der Bioabfallverordnung entspricht (max. 30 t ha<sup>-1</sup> TM in 3 Jahren). Dies wurde jedoch unter Versuchsbedingungen in Kauf genommen.



Tabelle 45: Beschreibung der Prüfglieder im Feldversuch

| Prüfglied-Nr. | Bezeichnung             | Beschreibung  |
|---------------|-------------------------|---|
| 1             | Kontrolle               | keine Düngung   |
| 2             | Fein niedrig (FN)       | <u>Bis Mai 2015:</u> kombinierte Düngung mit dem jeweiligen GP und KAS. 100 kg ha <sup>-1</sup> N aus dem GP, mit KAS Ergänzung auf 120 kg ha <sup>-1</sup> N <sub>verf.</sub><br><u>Ab Juni 2015:</u> Düngung ausschließlich mit GP entsprechend 5 t ha <sup>-1</sup> Trockenmasse |
| 3             | Grob niedrig (GN)       |   |
| 4             | Agglomerat niedrig (AN) |   |
| 5             | Pellet niedrig (PN)     |   |
| 6             | Fein hoch (FH)          | <u>Bis Mai 2015:</u> Düngung ausschließlich mit GP entsprechend 200 kg ha <sup>-1</sup> N<br><u>Ab Juni 2015:</u> Düngung ausschließlich mit GP entsprechend 10 t ha <sup>-1</sup> Trockenmasse   |
| 7             | Grob hoch (GH)          |   |
| 8             | Agglomerat hoch (AH)    |   |
| 9             | Pellet hoch (PH)        |   |
| 10            | KAS 30                  | Düngung mit KAS entsprechend 30, 60 und 120 kg ha <sup>-1</sup> N   |
| 11            | KAS 60                  |   |
| 12            | KAS 120                 |   |

Der Feldversuch wurde mit Parzellengrößen von 4,5 x 10,0 m angelegt, wobei eine Kernfläche von 3,0 x 8,0 m gedüngt wurde (Abbildung 30), aus der wiederum ein Mittelstreifen von 1,5 m Breite geerntet wurde.



Abbildung 30: Parzellen mit frisch ausgebrachten Gärprodukten im Feldversuch im Herbst 2015

Neben Stickstoff wurden durch die Gärprodukte auch die in Tabelle 46 aufgeführten Mengen an Phosphor und Kalium ausgebracht. Zusätzlich wurden in allen Parzellen zu Senf und Roggen je 160 und zu Weizen 80 kg ha<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>O gedüngt, sowie zu Weizen außerdem 150 kg ha<sup>-1</sup> Kieserit.

Tabelle 46: Durch die Gärprodukte ausgebrachte Mengen an Phosphor und Kalium im Feldversuch

| Gärprodukt                 | Niedrige Aufwandmenge                     |        | Hohe Aufwandmenge |        |
|----------------------------|---|--------|-------------------|--------|
|                            | Phosphor                                  | Kalium | Phosphor          | Kalium |
|                            | ausgebrachte Menge in kg ha <sup>-1</sup> |        |                   |        |
| 1. Ausbringung (zu Senf)   |   |        |                   |        |
| Feinfraktion               | 17,0                                      | 82,7   | 34,0              | 165,4  |
| Grobfraktion               | 22,8                                      | 92,2   | 45,5              | 184,4  |
| Agglomerate                | 20,2                                      | 92,9   | 40,4              | 185,7  |
| Pellets                    | 17,9                                      | 84,7   | 35,9              | 169,5  |
| 2. Ausbringung (zu Roggen) |   |        |                   |        |
| Feinfraktion               | 16,2                                      | 72,8   | 32,5              | 145,7  |
| Grobfraktion               | 15,6                                      | 67,9   | 31,1              | 135,7  |
| Agglomerate                | 11,5                                      | 55,3   | 23,0              | 110,6  |
| Pellets                    | 18,6                                      | 82,0   | 37,1              | 164,0  |
| 3. Ausbringung (zu Mais)   |   |        |                   |        |
| Feinfraktion               | 13,5                                      | 53,5   | 27,0              | 107,0  |
| Grobfraktion               | 15,5                                      | 57,5   | 31,0              | 115,0  |
| Agglomerate                | 13,5                                      | 57,0   | 27,0              | 114,0  |
| Pellets                    | 14,5                                      | 57,5   | 29,0              | 115,0  |
| 4. Ausbringung (zu Weizen) |   |        |                   |        |
| Feinfraktion               | 15,5                                      | 60,0   | 31,0              | 120,0  |
| Grobfraktion               | 16,5                                      | 62,5   | 33,0              | 125,0  |
| Agglomerate                | 15,0                                      | 61,0   | 30,0              | 122,0  |
| Pellets                    | 14,0                                      | 53,5   | 28,0              | 107,0  |

#### Ausgebrachte Mengen an Gärprodukten und Schwermetallen

In Tabelle 47 sind die ausgebrachten Gesamtmengen der einzelnen Gärprodukte und die damit verbundenen Schwermetallfrachten aufgelistet.

Tabelle 47: Ausgebrachte Mengen an Gärprodukten insgesamt und an darin enthaltenen Schwermetallen (Summe aus vier Ausbringungen).

| Gärprodukt   | Niedrige Aufwandmenge   |        |        |        | Hohe Aufwandmenge |        |        |        |
|--------------|---|--------|--------|--------|-------------------|--------|--------|--------|
|              | Ausgebrachte Menge an Gärprodukten als Summe aller vier Ausbringungen<br>t ha <sup>-1</sup>   |        |        |        |                   |        |        |        |
| Feinfraktion | 20,2  |        |        |        | 40,4              |        |        |        |
| Grobfraktion | 21,3  |        |        |        | 42,5              |        |        |        |
| Agglomerate  | 20,8  |        |        |        | 41,6              |        |        |        |
| Pellets      | 21,4  |        |        |        | 42,8              |        |        |        |
| Gärprodukt   | Ausgebrachte Menge an Schwermetallen als Summe aller vier Ausbringungen<br>g ha <sup>-1</sup> |        |        |        |                   |        |        |        |
|              | Cd  | Cr     | Cu     | Pb     | Cd                | Cr     | Cu     | Pb     |
| Feinfraktion | 25,1  | 723,5  | 954,9  | 2026,0 | 50,1              | 1447,0 | 1909,8 | 4051,9 |
| Grobfraktion | 22,7  | 1340,5 | 945,3  | 1871,1 | 45,4              | 2681,1 | 1890,5 | 3742,1 |
| Agglomerate  | 24,2  | 829,0  | 1068,8 | 3405,9 | 48,3              | 1657,9 | 2137,6 | 6811,8 |
| Pellets      | 25,1  | 1150,3 | 1599,8 | 2392,0 | 50,2              | 2300,6 | 3199,6 | 4783,9 |

#### Untersuchungen

Bei Roggen, Mais und Weizen wurde die Entwicklung des Blattgrüns mit Hilfe eines Yara-N-Testers dokumentiert. Dazu wurde pro Parzelle ein Messwert erhoben, der sich aufgrund der Funktionsweise des Gerätes aus 30 Einzelmessungen an verschiedenen Pflanzen zusammensetzt. Bei Roggen und Mais wurde zusätzlich die Wuchshöhe in allen Parzellen zu drei bzw. 13 Terminen bestimmt, wobei je Parzelle 10 zufällig ausgewählte Pflanzen bis zum höchsten Punkt der Ein-

zelpflanze vermessen wurden. Die Daten wurden dann zu einem Mittelwert pro Parzelle zusammengefasst. Bei Roggen und Weizen wurde die Anzahl der ährentragenden Halme je Quadratmeter bestimmt durch Auszählung von je drei einzelnen Metern entlang der Drillrichtung pro Parzelle.

Die Bodenbeprobung wurde vor Versuchsbeginn (März 2014) sowie im Herbst 2014, im Herbst 2015 und im Sommer 2016 jeweils nach der Ernte und vor der Ausbringung neuer Gärprodukte durchgeführt. Mit einem Bohrstock wurden jeweils Proben bis 20 cm Tiefe entnommen zur Bestimmung des pH-Wertes, des Kohlenstoffgehalts ( $C_{ges}$ ) und ausgewählter Pflanzennährstoffe ( $N_{ges}$ ,  $P_{DL}$ ,  $K_{DL}$ ). Ab Herbst 2015 wurden die Proben auch auf die vier Schwermetalle Cadmium, Chrom, Kupfer und Blei (Cd, Cr, Cu, Pb) untersucht. Die Bodenproben wurden auf 2 mm gesiebt und analysiert wie in Kapitel 3.4 beschrieben. Die Messung der Schwermetallgehalte erfolgte mittels ICP-OES nach Aufschluss mit Königswasser. Zusätzlich wurden Proben in 0-30, 30-60 und 60-90 cm Tiefe genommen zur Bestimmung des mineralischen Stickstoffs ( $N_{min}$ ). Die Messung des  $N_{min}$  erfolgte mit einem Spektralphotometer „Continuous Flow Analyser“ (CFA) nach Calciumchlorid - Aufschluss.

Senf, Winterroggen und Silomais wurden mit einem Feldhäcksler geerntet, Winterweizen mit einem Parzellenmähdrescher. Von jeder Parzelle wurden Proben der Gesamtpflanze bzw. bei Weizen von Stroh und Korn genommen, für die weiteren Analysen bei 60 °C getrocknet und auf 1 mm gemahlen. Die Bestimmung des Trockensubstanzgehaltes erfolgte durch Trocknung separater Proben bei 105 °C. Das Pflanzenmaterial wurde auf die Gehalte an N, P und K untersucht. Die Analysen wurden durchgeführt wie in Kapitel 3.4 beschrieben. Der Proteingehalt von Weizen wurde durch Multiplikation der N-Gehalte mit 5,7 berechnet (Botterbrodt *et al.*, 1999).

#### Statistische Analyse

Die Ergebnisse wurden mit Hilfe von SPSS Statistics Desktop 20.0 für Windows auf signifikante Unterschiede untersucht (einfaktorielle ANOVA gefolgt vom Tukey's HSD Test ( $P \leq 0.05$ )).

### 3.6.3 Ergebnisse und Diskussion

#### 3.6.3.1 Wirkungen der Gärprodukte auf den Boden

##### *pH-Wert*

Der pH-Wert des Bodens schwankte zu Versuchsbeginn zwischen 5,70 und 5,90. Bis zum Versuchsende sanken die Werte in den nur mit KAS gedüngten Parzellen und in den Kontrollen leicht ab, wobei der Abfall in der Variante KAS 120 am stärksten ausfiel (Abbildung 31). Hier sanken die Werte von 5,78 auf 5,50. Dies ist nicht überraschend, denn ammoniumhaltige Mineraldünger wie KAS führen in der Regel zu pH-Wert-Absenkungen, weil es zu Nitrifikation kommt oder weil Pflanzenwurzeln bei der Aufnahme von Ammonium zum Ladungsausgleich andere Anionen aus der Bodenlösung aufnehmen oder Protonen abgeben (Bauer, 2011).

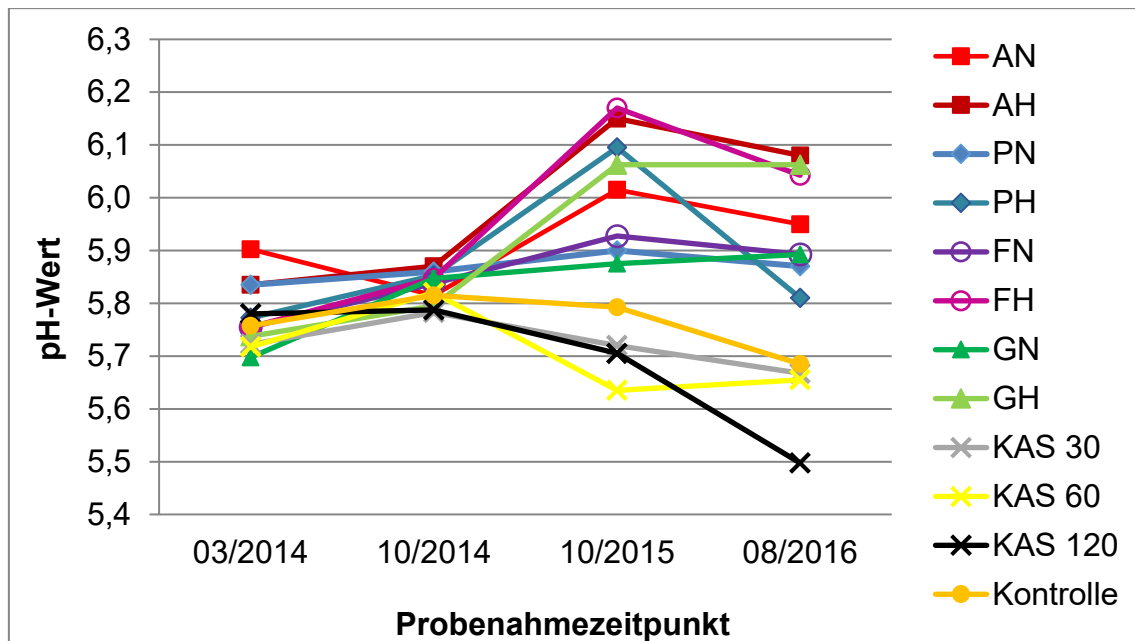


Abbildung 31: Entwicklung des pH-Wertes im Feldversuch. Daten sind Mittelwerte aus vier Wiederholungen.

Der in KAS enthaltene Kalk kann diese Wirkung zum Teil abfangen, nicht aber ganz aufheben (Watson *et al.*, 1995). In den mit Gärprodukten gedüngten Varianten war demgegenüber ausnahmslos ein Anstieg der pH-Werte zu verzeichnen, der in den Parzellen mit niedriger Aufwandmenge zwischen 0,03 und 0,19 betrug und in den Parzellen mit der hohen Aufwandmenge zwischen 0,04 und 0,33. Die Pellets beeinflussten den pH-Wert am wenigsten, die Grobfraction am stärksten, unabhängig von der Aufwandmenge. Eine deutliche Differenzierung zwischen den Varianten trat erst im Herbst des zweiten Versuchsjahres auf, während im Oktober 2014, ca. 4 Monate nach der Ausbringung, noch keine wesentlichen Unterschiede zu beobachten waren. Die Veränderung der pH-Werte scheint sich über die drei Probenahmezeitpunkte während der Versuchslaufzeit in den einzelnen Varianten zu verstetigen. Andererseits sind die Veränderungen mit maximal 0,33 nur geringfügig größer als die natürliche Variabilität von 0,20, die zwischen den Parzellen zu Versuchsbeginn festgestellt wurde. Die Untersuchungen müssten fortgesetzt werden, um die scheinbar existierenden Trends abzusichern.

#### Stickstoffgehalte

Der Boden im Feldversuch wies zu Versuchsbeginn 81 mg 100 g<sup>-1</sup> N<sub>ges</sub> auf. Der N<sub>min</sub>-Gehalt betrug mit 0,15 mg 100 g<sup>-1</sup> etwa 0,19 % des N<sub>ges</sub>. Das entspricht einem mineralischen Stickstoffvorrat von 6,6 kg ha<sup>-1</sup>, bezogen auf eine Bodentiefe von 0 bis 30 cm. In den darunterliegenden Tiefen waren zusätzlich noch 3,5 kg ha<sup>-1</sup> N<sub>min</sub> (30-60 cm) bzw. 3,15 kg ha<sup>-1</sup> N<sub>min</sub> (60-90 cm) vorhanden. Die Gehalte an N<sub>ges</sub> wurden in den reinen Gärproduktvarianten über die gesamte Versuchsdauer hinweg kaum verändert (Tabelle 48), während in den KAS- und Kontrollparzellen bis zum Versuchsende eine Reduktion der Gesamtstickstoffgehalte um maximal 19 mg 100 g<sup>-1</sup> zu verzeichnen war. Im Herbst 2015, nach der Ernte von Mais, zeigte sich allerdings in allen Varianten ein Abfall der N<sub>ges</sub>-Gehalte auf bis zu 39 mg 100 g<sup>-1</sup> (KAS 30), dem in allen Parzellen ein Anstieg bis zum Sommer 2016 folgte.

Tabelle 48: Gehalte an Gesamtstickstoff ( $N_{\text{ges}}$ ) und mineralischem Stickstoff ( $N_{\text{min}}$ ) in verschiedenen Bodentiefen im Feldversuch in Abhängigkeit von Düngerart, Aufwandmenge und Probenahmezeitpunkt. Daten sind Mittelwerte aus vier Wiederholungen. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer Spalte (Tukey's HSD Test,  $p \leq 0,05$ ).

| Zeitpunkt | 10/2014   |   |                             |                             | 10/2015   |   |                             |                              | 08/2016   |   |                             |                            |
|-----------|---|---|-----------------------------|-----------------------------|---|---|-----------------------------|------------------------------|---|---|-----------------------------|----------------------------|
| Variante  | $N_{\text{ges}}$ -<br>Gehalte<br>mg 100 g <sup>-1</sup> | $N_{\text{min}}$ –Gehalte<br>mg 100 g <sup>-1</sup><br>(kg ha <sup>-1</sup> ) |                             |                             | $N_{\text{ges}}$ -<br>Gehalte<br>mg 100 g <sup>-1</sup> | $N_{\text{min}}$ –Gehalte<br>mg 100 g <sup>-1</sup><br>(kg ha <sup>-1</sup> ) |                             |                              | $N_{\text{ges}}$ -<br>Gehalte<br>mg 100 g <sup>-1</sup> | $N_{\text{min}}$ –Gehalte<br>mg 100 g <sup>-1</sup><br>(kg ha <sup>-1</sup> ) |                             |                            |
|           | 0-20 cm   | 0-30 cm   | 30-60 cm                    | 60-90 cm                    | 0-20 cm   | 0-30 cm   | 30-60 cm                    | 60-90 cm                     | 0-20 cm   | 0-30 cm   | 30-60 cm                    | 60-90 cm                   |
| AN        | 76,50 <sup>a</sup>                                      | 0,64 <sup>a</sup><br>(28,7)   | 0,25 <sup>a</sup><br>(11,4) | 0,28 <sup>a</sup><br>(12,7) | 51,75 <sup>a</sup>                                      | 0,14 <sup>abc</sup><br>(6,3)  | 0,09 <sup>a</sup><br>(4,1)  | 0,08 <sup>ab</sup><br>(3,8)  | 82,75 <sup>ab</sup>                                     | 0,41 <sup>ab</sup><br>(18,3)  | 0,18 <sup>ab</sup><br>(8,1) | 0,12 <sup>a</sup><br>(5,4) |
| AH        | 77,75 <sup>a</sup>                                      | 0,31 <sup>a</sup><br>(14,2)   | 0,22 <sup>a</sup><br>(9,8)  | 0,23 <sup>a</sup><br>(10,2) | 44,75 <sup>a</sup>                                      | 0,63 <sup>bc</sup><br>(28,2)  | 0,65 <sup>b</sup><br>(29,4) | 0,54 <sup>ab</sup><br>(24,4) | 84,25 <sup>b</sup>                                      | 0,45 <sup>ab</sup><br>(20,2)  | 0,18 <sup>ab</sup><br>(8,2) | 0,12 <sup>a</sup><br>(5,2) |
| PN        | 78,50 <sup>a</sup>                                      | 0,62 <sup>a</sup><br>(27,7)   | 0,26 <sup>a</sup><br>(11,8) | 0,35 <sup>a</sup><br>(15,6) | 68,00 <sup>a</sup>                                      | 0,67 <sup>c</sup><br>(30,0)   | 0,65 <sup>b</sup><br>(29,4) | 0,70 <sup>b</sup><br>(31,7)  | 74,00 <sup>ab</sup>                                     | 0,39 <sup>ab</sup><br>(17,7)  | 0,18 <sup>ab</sup><br>(8,0) | 0,11 <sup>a</sup><br>(5,1) |
| PH        | 76,75 <sup>a</sup>                                      | 0,33 <sup>a</sup><br>(14,7)   | 0,20 <sup>a</sup><br>(9,2)  | 0,17 <sup>a</sup><br>(7,6)  | 62,00 <sup>a</sup>                                      | 0,13 <sup>ab</sup><br>(5,8)   | 0,09 <sup>a</sup><br>(4,2)  | 0,09 <sup>ab</sup><br>(4,2)  | 77,50 <sup>ab</sup>                                     | 0,43 <sup>ab</sup><br>(19,4)  | 0,16 <sup>ab</sup><br>(7,3) | 0,11 <sup>a</sup><br>(4,8) |
| FN        | 77,25 <sup>a</sup>                                      | 0,38 <sup>a</sup><br>(17,3)   | 0,22 <sup>a</sup><br>(9,9)  | 0,22 <sup>a</sup><br>(9,8)  | 59,75 <sup>a</sup>                                      | 0,12 <sup>ab</sup><br>(5,3)   | 0,11 <sup>a</sup><br>(4,9)  | 0,11 <sup>ab</sup><br>(5,1)  | 76,00 <sup>ab</sup>                                     | 0,41 <sup>ab</sup><br>(18,3)  | 0,17 <sup>ab</sup><br>(7,8) | 0,11 <sup>a</sup><br>(5,1) |
| FH        | 79,50 <sup>a</sup>                                      | 0,22 <sup>a</sup><br>(9,7)  | 0,16 <sup>a</sup><br>(7,2)  | 0,20 <sup>a</sup><br>(9,2)  | 53,67 <sup>a</sup>                                      | 0,10 <sup>a</sup><br>(4,5)  | 0,05 <sup>a</sup><br>(2,3)  | 0,06 <sup>a</sup><br>(2,9)   | 79,25 <sup>ab</sup>                                     | 0,45 <sup>ab</sup><br>(20,3)  | 0,15 <sup>a</sup><br>(6,6)  | 0,10 <sup>a</sup><br>(4,7) |
| GN        | 82,00 <sup>a</sup>                                      | 0,46 <sup>a</sup><br>(20,9)   | 0,25 <sup>a</sup><br>(11,4) | 0,24 <sup>a</sup><br>(10,6) | 48,50 <sup>a</sup>                                      | 0,11 <sup>ab</sup><br>(5,0)   | 0,09 <sup>a</sup><br>(3,9)  | 0,10 <sup>ab</sup><br>(4,37) | 70,25 <sup>ab</sup>                                     | 0,39 <sup>ab</sup><br>(17,5)  | 0,15 <sup>ab</sup><br>(6,9) | 0,10 <sup>a</sup><br>(4,3) |
| GH        | 81,75 <sup>a</sup>                                      | 0,25 <sup>a</sup><br>(11,1)   | 0,17 <sup>a</sup><br>(7,4)  | 0,21 <sup>a</sup><br>(9,5)  | 58,50 <sup>a</sup>                                      | 0,11 <sup>ab</sup><br>(5,1)   | 0,06 <sup>a</sup><br>(2,9)  | 0,05 <sup>a</sup><br>(2,4)   | 82,00 <sup>ab</sup>                                     | 0,43 <sup>ab</sup><br>(19,5)  | 0,17 <sup>ab</sup><br>(7,8) | 0,11 <sup>a</sup><br>(4,8) |
| KAS 30    | 76,50 <sup>a</sup>                                      | 0,26 <sup>a</sup><br>(11,7)   | 0,19 <sup>a</sup><br>(8,4)  | 0,22 <sup>a</sup><br>(10,1) | 39,25 <sup>a</sup>                                      | 0,11 <sup>ab</sup><br>(4,9)   | 0,06 <sup>a</sup><br>(2,8)  | 0,08 <sup>ab</sup><br>(3,7)  | 63,75 <sup>a</sup>                                      | 0,32 <sup>a</sup><br>(14,3)   | 0,15 <sup>ab</sup><br>(6,9) | 0,07 <sup>a</sup><br>(3,3) |
| KAS 60    | 77,00 <sup>a</sup>                                      | 0,30 <sup>a</sup><br>(13,4)   | 0,18 <sup>a</sup><br>(8,1)  | 0,20 <sup>a</sup><br>(9,1)  | 56,00 <sup>a</sup>                                      | 0,11 <sup>ab</sup><br>(4,7)   | 0,10 <sup>a</sup><br>(4,4)  | 0,07 <sup>ab</sup><br>(3,1)  | 69,00 <sup>ab</sup>                                     | 0,31 <sup>a</sup><br>(13,7)   | 0,13 <sup>a</sup><br>(5,8)  | 0,08 <sup>a</sup><br>(3,6) |
| KAS 120   | 78,00 <sup>a</sup>                                      | 0,69 <sup>a</sup><br>(30,9)   | 0,36 <sup>a</sup><br>(16,4) | 0,26 <sup>a</sup><br>(11,9) | 48,00 <sup>a</sup>                                      | 0,13 <sup>ab</sup><br>(6,0)   | 0,08 <sup>a</sup><br>(3,5)  | 0,07 <sup>ab</sup><br>(3,2)  | 70,00 <sup>ab</sup>                                     | 0,87 <sup>b</sup><br>(39,2)   | 0,30 <sup>b</sup><br>(13,6) | 0,14 <sup>a</sup><br>(6,2) |
| Kontrolle | 76,25 <sup>a</sup>                                      | 0,30 <sup>a</sup><br>(13,5)   | 0,23 <sup>a</sup><br>(10,2) | 0,24 <sup>a</sup><br>(10,6) | 48,75 <sup>a</sup>                                      | 0,07 <sup>a</sup><br>(3,2)  | 0,03 <sup>a</sup><br>(1,4)  | 0,01 <sup>a</sup><br>(0,6)   | 66,25 <sup>ab</sup>                                     | 0,39 <sup>ab</sup><br>(17,7)  | 0,15 <sup>a</sup><br>(6,7)  | 0,09 <sup>a</sup><br>(4,0) |

Wie Tabelle A6 zu entnehmen ist, wurde das Absinken der Stickstoffgehalte im Herbst 2015 zu einem großen Teil durch die kombinierten N-Entzüge von Roggen und Mais verursacht, die deutlich höher ausfielen als durch Weizen in den darauf folgenden Monaten. Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten wurden nur zum letzten Probenahmetermin festgestellt. Hier wies die Variante AH mit  $84 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$  um ein Drittel höhere Werte auf als die Variante KAS 30.

Die Gehalte an  $N_{\min}$  stiegen zum Oktober 2014 in allen Tiefen an und sanken im Oktober 2015 wieder auf das Niveau der Ausgangswerte ab. Eine Ausnahme stellen im Oktober 2015 die Varianten AH und PN dar, die mit  $0,63$  bzw.  $0,67 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$  in den oberen 30 cm zu diesem Zeitpunkt bis zu neunmal höhere Gehalte aufwiesen als alle anderen Varianten. Dies setzte sich auch in den beiden anderen Probenahmetiefen fort. Statistisch signifikante Differenzen in dieser Größenordnung wurden in keinem anderen Fall beobachtet. Es steht zu vermuten, dass diesen Werten ein Fehler bei der Probeaufbereitung oder Analyse zugrunde liegt, denn eine Verlagerung von größeren Mengen mineralischen Stickstoffs aus Pellets und Agglomeraten bis in eine Bodentiefe von 90 cm ist nach allen bisherigen Erfahrungen sehr unwahrscheinlich. Außerdem hätten sich so große Mengen an pflanzenverfügbarem Stickstoff im Ertrag von Mais oder dem darauf folgenden Weizen bemerkbar machen müssen, was nicht der Fall war. Die auffälligen Proben wurden im Labor laut Probenliste direkt nacheinander abgearbeitet, was umso mehr vermuten lässt, dass hier eine ganze Gruppe von Proben falsch behandelt und/oder analysiert wurde. Abgesehen von diesen Ausreißern zeigten sich in Oktober 2014 und Oktober 2015 in keiner Probenahmetiefe signifikante Unterschiede zwischen den Varianten. Im August 2016 waren die Gehalte an mineralischem Stickstoff in den oberen beiden Probenahmetiefen höher als in den Vorjahren. Dies betraf, anders als im Jahr 2015, alle Varianten. In den oberen 30 cm bestanden signifikante Unterschiede nur zwischen der KAS 120-Variante, die mit  $0,87 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$  die höchsten Gehalte aufwies, und den beiden niedrigeren KAS-Varianten. Bei KAS-120 wurde die Stickstoffdüngung zu Weizen in zwei Gaben aufgeteilt. Die zweite Hälfte wurde am 19. Mai gedüngt. In den darauf folgenden Wochen kam es jedoch nur zu unzureichenden Niederschlägen (vergl. Abbildung 29). Die hohen Gehalte an  $N_{\min}$  in dieser Variante nach der Ernte sind vermutlich darauf zurückzuführen, dass die zweite Stickstoffgabe aufgrund des Wassermangels durch den Weizen nicht voll aufgenommen werden konnte. In der Probenahmetiefe 30-60 cm fanden sich aufgrund von Auswaschungsverlusten ebenfalls höhere Gehalte an  $N_{\min}$  in der KAS 120-Variante, während sich der Effekt in der darunter liegenden Schicht nicht mehr nachweisen ließ. Lässt man die Ausreißer im Jahr 2015 unbeachtet, so führte die Anwendung der Gärprodukte unabhängig von der Aufwandmenge zu keinem Zeitpunkt und in keiner der untersuchten Probenahmetiefen zu von der ungedüngten Kontrolle signifikant verschiedenen Gehalten an  $N_{\min}$ .

Vergleicht man die ausgebrachten und entzogenen Mengen an Stickstoff über die gesamte Versuchsdauer hinweg, so wird deutlich, dass vor allem in den Varianten mit hohen Aufwandsmengen an Gärprodukten große Differenzen zwischen Entzug und ausgebrachter Menge bestehen. Mit vier Ausbringungen wurden in diesen Varianten zwischen  $802$  (Agglomerate) und  $878 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$  (Grobfraktion) ausgebracht, von denen nur  $244$  (Agglomerate und Grobfraktion) bis  $271 \text{ kg ha}^{-1}$  (Feinfraktion) durch die Pflanzen wieder aufgenommen wurden. Der Erhalt der Ausgangsgehalte

an Stickstoff im Boden trotz des Anbaus von vier aufeinander folgenden Kulturarten ist das Ergebnis dieser Stickstoffzufuhr. Dass die Gehalte im Boden nicht über die Ausgangswerte hinaus angestiegen sind, ist vermutlich auf Verluste durch Auswaschung und Ausgasung, aber auch auf die langsamen Zerfallseigenschaften der Produkte und die Probenaufbereitung zurückzuführen. Durch das übliche Sieben der Bodenproben auf 2 mm werden Agglomerate und Pellets sowie größere Bestandteile von Fein- und Grobfraction ausgesiebt. Zu allen Probenahmezeitpunkten waren im Feldversuch noch nicht zersetzte Bestandteile der Gärprodukte und z. T. ganze Agglomerate bzw. Pellets mit bloßem Auge zu sehen. Darin enthaltene Nährstoffe und Schwermetalle wurden durch das Sieben der Proben entfernt und somit nicht in den Analysen erfasst, obwohl sie langfristig im Boden verfügbar werden würden. Diese Vorgehensweise muss bei ähnlichen Versuchen in Zukunft eventuell angepasst werden.

#### *Gehalte an Phosphor und Kalium*

Die Gehalte an pflanzenverfügbarem Phosphor im Boden, bestimmt durch Doppellactat-Methode, sanken in allen Varianten im Laufe des Versuches um ein Viertel bis ein Drittel ab (Abbildung 32).

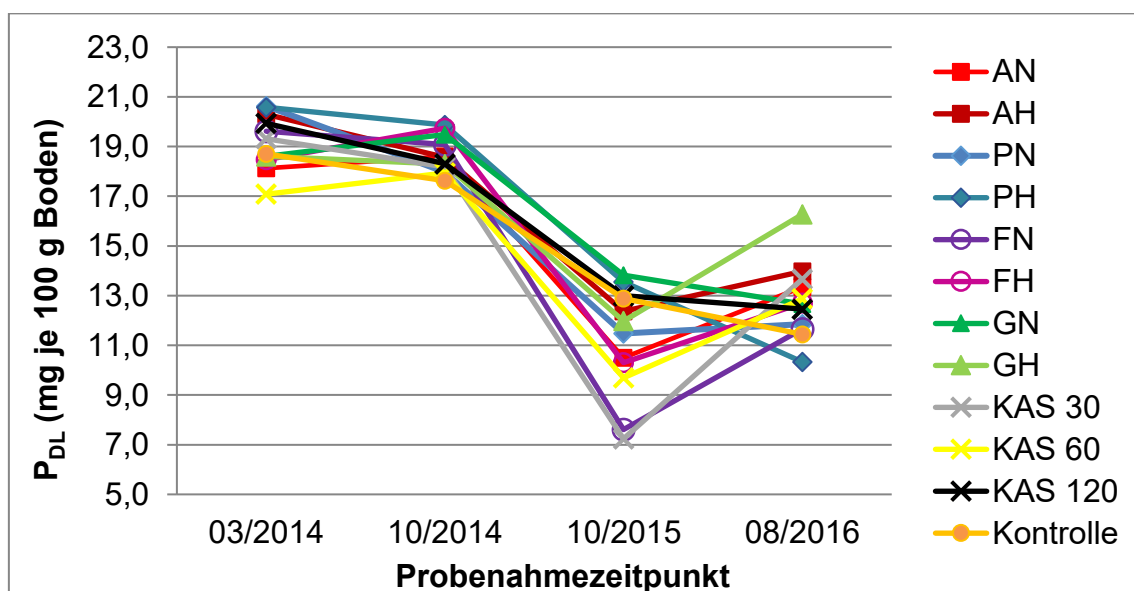


Abbildung 32: Entwicklung der Phosphorgehalte des Bodens im Feldversuch. Daten sind Mittelwerte aus vier Wiederholungen.

Der stärkste Rückgang war im Herbst 2015 zu beobachten, nach der Ernte von Mais. Mais stellt allerdings auch deutlich höhere Anforderungen an die Phosphorversorgung als Getreide (Baumgärtel, 2015). Wie Tabelle A 6 zu entnehmen, waren die Phosphorentzüge durch Mais dementsprechend in den Gärproduktvarianten deutlich höher als durch den davor angebauten Roggen bzw. durch den darauffolgenden Weizen, was die starke Abnahme der Gehalte im Boden erklärt. Ein klarer Zusammenhang zwischen der Aufwandmenge an Gärprodukten und dem Ausmaß des Rückgangs bzw. der Relation zur ungedüngten Kontrolle war nicht zu erkennen, d.h. die höhere Aufwandmenge der Gärprodukte führte trotz der größeren Menge an zugeführtem Phosphor nicht zwangsläufig zu höheren Gehalten an pflanzenverfügbarem Phosphor im Boden.



Die Kaliumgehalte des Bodens sind aufgrund der Ergänzungsdüngung zu Senf, Roggen und Weizen in ihrer absoluten Höhe nur schwer zu beurteilen. Es wird jedoch deutlich, dass mit zunehmender Versuchslaufzeit die Gehalte der Gärproduktvarianten, insbesondere bei hoher Aufwandmenge, in der Regel über denen der Mineraldüngervarianten lagen, was auf geringere Entzüge durch geringere Erträge einerseits und auf die zusätzliche Kaliumzufuhr durch die Gärprodukte andererseits zurückzuführen ist (Abbildung 33).

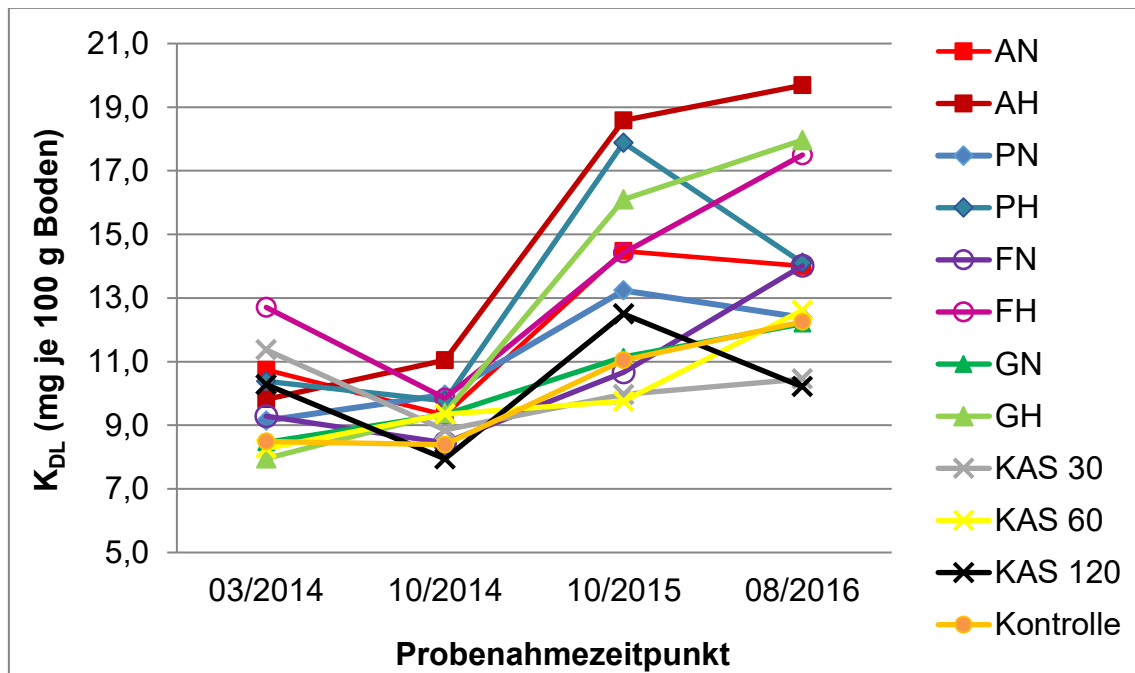


Abbildung 33: Entwicklung der Kaliumgehalte des Bodens im Feldversuch. Daten sind Mittelwerte aus vier Wiederholungen.

Auffällig ist, dass es in der Kontrolle zu einem Anstieg der  $N_{\text{ges}}$ - und Kaliumgehalte und in den KAS 30- und KAS 60-Varianten zu einem Anstieg der Phosphorgehalte zum letzten Probenahmetermin kam, obwohl in der Kontrolle kein Stickstoff und in den KAS-Varianten kein Phosphor gedüngt wurde. Bei Kalium wäre dies eventuell noch durch die variantenübergreifende Ergänzungsdüngung zu erklären, auf Stickstoff und Phosphor trifft dies aber nicht zu. Im Oktober und November 2015 traten allerdings nach der Ausbringung der Gärprodukte überdurchschnittlich starke Niederschläge auf (vergl. Abbildung 29). Da im Feldversuch ein leichter Höhenunterschied zwischen der süd-östlichen und der nord-westlichen Ecke besteht, ist ein Austrag von Gärprodukten oder Nährstoffen in benachbarte Parzellen im Herbst 2015 nicht auszuschließen.

#### Kohlenstoffgehalte

Die Kohlenstoffgehalte des Bodens stiegen, ausgehend von Gehalten zwischen 0,81 und 0,91 %, in allen Parzellen leicht an (Abbildung 34). Dieser Anstieg verlief in den Gärprodukt-Parzellen am steilsten, wobei bei den einzelnen Gärprodukten jeweils in den Varianten mit der hohen Aufwandmenge höhere Endgehalte erreicht wurden als in den Varianten mit der niedrigen Aufwandmenge. Mit 1,21 % wurden am Ende des Versuches die höchsten Kohlenstoffgehalte in den AH-Parzellen gefunden, während die Kontrollparzellen mit 0,94 % die geringsten Endgehalte aufwiesen.



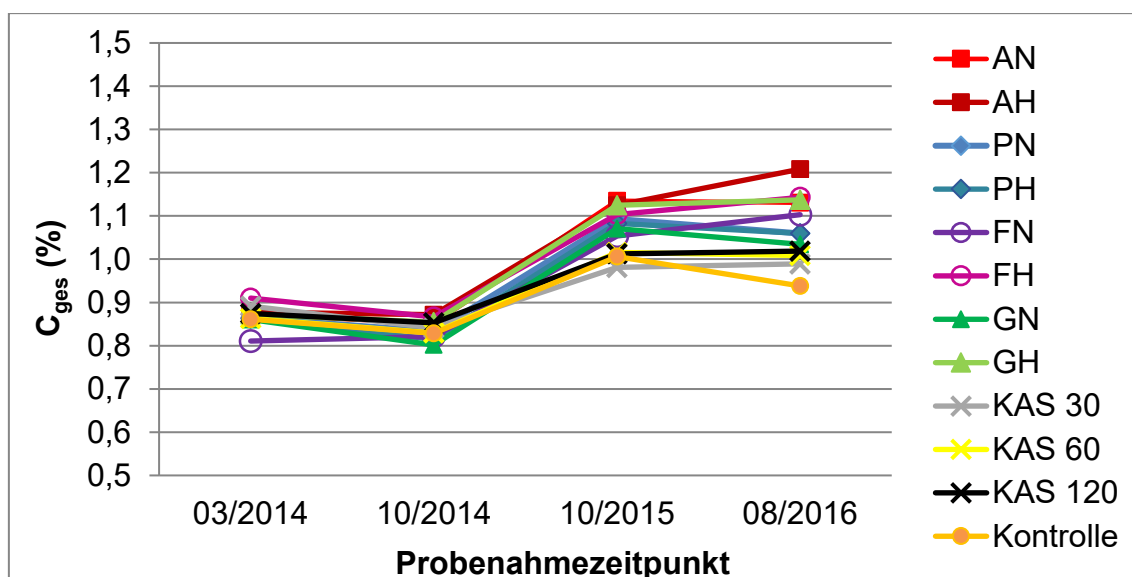


Abbildung 34: Entwicklung der Kohlenstoffgehalte ( $C_{\text{ges}}$ ) des Bodens im Feldversuch. Daten sind Mittelwerte aus vier Wiederholungen.

Die mit KAS gedüngten Parzellen erreichten am Ende des Versuches mit 0,99 bis 1,02 % leicht höhere Kohlenstoffgehalte als die Kontrolle. Mineraldüngung führt zu einer Anhebung der Humusgehalte, weil durch die Düngung die Erträge und damit auch die Menge der Wurzel- und Ernterückstände gesteigert werden (Blume *et al.*, 2010). Die Gehalte der Mineraldünger-Parzellen blieben jedoch unter denen der Gärprodukte, die zwar viel geringere Düngeeffekte besaßen, dafür aber selbst erhebliche Mengen an Kohlenstoff in den Boden einbrachten.

Ein Anstieg der Kohlenstoffgehalte um bis zu 0,33 Prozentpunkte, wie er in der Variante AH beobachtet wurde, erscheint sehr hoch. Geht man von einer Lagerungsdichte von  $1,5 \text{ g cm}^{-3}$  und der Probenahmetiefe von 20 cm aus, so wäre zum Erreichen eines solchen Anstiegs eine Zugabe von  $9,9 \text{ t ha}^{-1}$  Kohlenstoff notwendig. Durch die Gärprodukte wurden in der Summe der vier Anwendungen in den Parzellen mit der hohen Aufwandmenge 7,2 (AH), 8,1 (FH), 8,7 (PH) bzw. 9,4 (GH)  $\text{t ha}^{-1}$  Kohlenstoff ausgebracht. Bezieht man in die Überlegungen noch Ernte- und Wurzelrückstände mit ein, so scheint die Bilanz aufzugehen und damit eine erhebliche Beeinflussung des Kohlenstoffgehaltes im Boden durch die Anwendung kompostierter Gärprodukte möglich zu sein. Andererseits wird üblicherweise im Zusammenhang mit organischen Düngern davon ausgegangen, dass ein Teil der organischen Substanz bereits innerhalb weniger Tage durch Mikroorganismen abgebaut wird (Wragge, 2014). Durch die Bodenatmungsversuche wurde im Rahmen dieser Arbeit bereits nachgewiesen, dass schon innerhalb der ersten 100 Tage bis zu 32 % des Kohlenstoffs in den Gärprodukten mineralisiert wird. Dies lässt eher darauf schließen, dass die Kohlenstoffgehalte zumindest in ihrer Höhe das Ergebnis jahreszeitlicher Schwankungen sind. Dass Witterung, Kulturart und Bearbeitungsmaßnahmen einen erheblichen Einfluss auf die Kohlenstoffgehalte im Boden besitzen, ist bekannt. Hillebrecht *et al.* (2009) fanden zum Beispiel in einem Feldversuch mit Weizen schon innerhalb eines Jahres Schwankungen des  $C_{\text{ges}}$ -Gehaltes von bis zu 0,19 Prozentpunkten. Zwischen verschiedenen Jahren sind mindestens ebenso große Abweichungen zu erwarten, zumal neben den jahreszeitlich bedingten Veränderungen in Bezug auf die Kohlenstoffgehalte auch eine große räumliche Heterogenität im Boden besteht

(Körschens *et al.*, 1997) und selbst in Parzellenversuchen kaum in jedem Jahr der exakt gleiche Probenahmepunkt ausgewählt werden kann. Dauerhaft höhere C-Gehalte stellen sich bei gleichmäßig hoher C-Zufuhr durch organische Düngung nur sehr langsam ein, wobei in Abhängigkeit vom Ausgangsniveau bis zu 50 Jahre bis zum Erreichen eines Fließgleichgewichts vergehen können (Körschens, 1997). Bodenproben aus wenigen aufeinander folgenden Jahren zu analysieren und daraus Rückschlüsse auf die langfristige Entwicklung des Kohlenstoffgehaltes zu ziehen, ist deshalb laut Beerbaum (2003) nicht zulässig. Vielmehr postuliert Körschens (2010), dass Untersuchungen über einen Zeitraum von mindestens 20 Jahren notwendig sind, um Veränderungen des Kohlenstoffgehaltes im Boden sicher feststellen zu können. Hinzu kommt, dass in Bezug auf den organischen Anteil des Gesamtkohlenstoffs nach Körschens (2010) selbst bei sorgfältiger Probenahme und -aufbereitung Messfehler von etwa 0,1 % C<sub>org</sub> nicht zu vermeiden sind. Angesichts derartiger Messungenauigkeiten und aufgrund der Tatsache, dass die Proben nicht immer zur gleichen Jahreszeit, geschweige denn unter gleichen Witterungsbedingungen genommen werden konnten, sollten die Unterschiede zwischen den Varianten und die absolute Höhe der Kohlenstoffgehalte nicht überbewertet werden. Es bleibt jedoch festzuhalten, dass sich spätestens ab dem zweiten Versuchsjahr eine deutliche Differenzierung zwischen Kontroll- und KAS-Varianten einerseits und Gärproduktvarianten andererseits herauszubilden scheint, die am letzten Probenahmetermin bei drei von vier Gärproduktvarianten (AH, FH und GH) zu im Vergleich zur Kontrolle signifikant höheren Kohlenstoffgehalten führte (Tabelle 49).

Tabelle 49: C<sub>ges</sub>-Gehalte des Bodens im August 2016. Daten sind Mittelwerte aus vier Wiederholungen  $\pm$  Standardabweichung. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen (Tukey's HSD Test,  $p \leq 0,05$ ).

| Variante  | C <sub>ges</sub> -Gehalte (%) zum letzten Probenahmetermin |
|-----------|--|
| AN        | 1,13 $\pm$ 0,08 <sup>bc</sup>                              |
| AH        | 1,21 $\pm$ 0,07 <sup>c</sup>                               |
| PN        | 1,06 $\pm$ 0,04 <sup>abc</sup>                             |
| PH        | 1,06 $\pm$ 0,12 <sup>abc</sup>                             |
| FN        | 1,10 $\pm$ 0,09 <sup>abc</sup>                             |
| FH        | 1,14 $\pm$ 0,06 <sup>bc</sup>                              |
| GN        | 1,03 $\pm$ 0,04 <sup>abc</sup>                             |
| GH        | 1,14 $\pm$ 0,05 <sup>bc</sup>                              |
| KAS 30    | 0,99 $\pm$ 0,10 <sup>ab</sup>                              |
| KAS 60    | 1,01 $\pm$ 0,06 <sup>ab</sup>                              |
| KAS 120   | 1,02 $\pm$ 0,06 <sup>ab</sup>                              |
| Kontrolle | 0,94 $\pm$ 0,04 <sup>a</sup>                               |

### 3.6.3.2 Wirkungen der Gärprodukte auf Kulturpflanzen

#### *Wachstum, Entwicklung und Ertragsbildung*

In Abbildung 35 sind die Erträge im Feldversuch dargestellt. Bei Senf zeigten sich nur geringe Unterschiede zwischen den Varianten. Die niedrigsten Biomasseerträge wurden mit 19,8 bzw. 21,3 dt ha<sup>-1</sup> durch die Grobfraktion bzw. in den Kontrollparzellen erzielt. Die höchsten Erträge wurden mit 28,1 bis 30,2 dt ha<sup>-1</sup> in den Parzellen verzeichnet, die Gärprodukte und KAS erhalten hatten. Die in Bezug auf die Menge an pflanzenverfügbarem Stickstoff vergleichbare Variante KAS 120 erbrachte im Mittel 26,9 dt ha<sup>-1</sup>. Die Kombination aus Gärprodukt und Mineraldünger

führte damit bei gleicher Stickstoffmenge tendenziell zu einem Mehrertrag gegenüber der reinen Mineraldüngung. Derartige Synergieeffekte den Pflanzenertrag betreffend wurden bereits von anderen Autoren dokumentiert (Bardos, 2004). Dieser Trend wiederholte sich beim auf den Senf folgenden Roggen, bei dem die kombinierten Varianten AN, PN, FN und GN mit 53,0 bis 69,1 dt ha<sup>-1</sup> alle leicht höhere Erträge erzielten als die vergleichbare Mineraldüngervariante KAS 120 mit 62,4 dt ha<sup>-1</sup>.

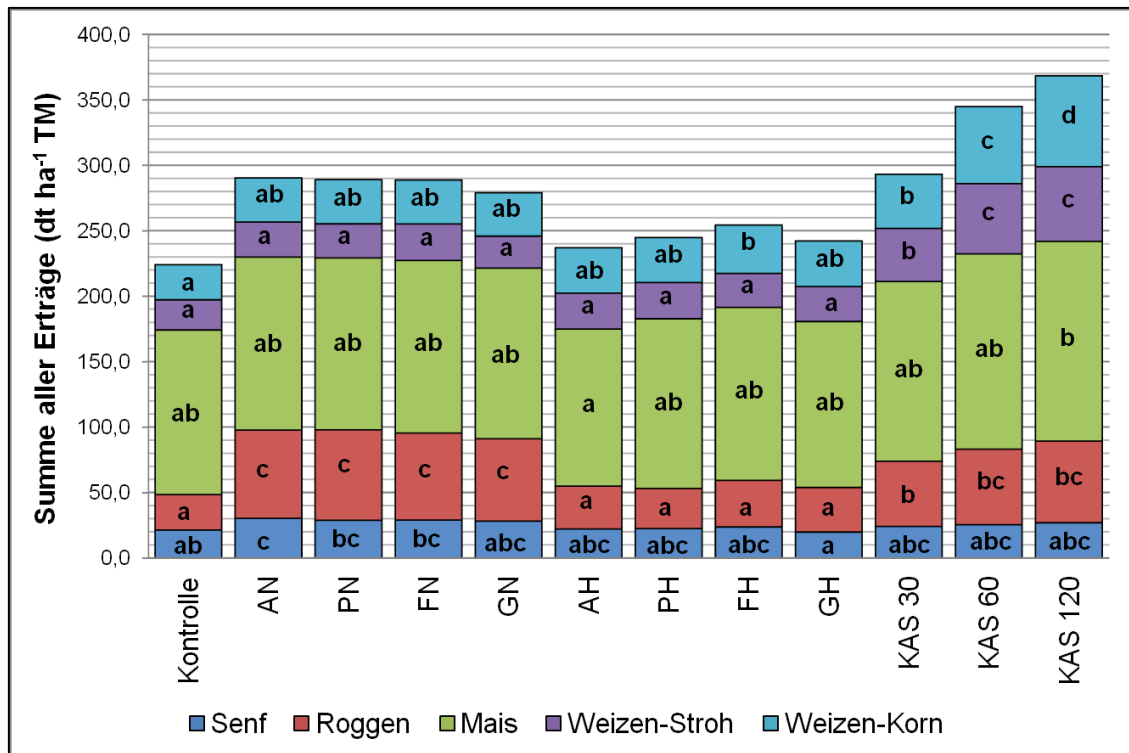


Abbildung 35: Trockenmasseerträge von Senf, Roggen, Mais und Weizen im Feldversuch. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen für die jeweilige Pflanzenart (Tukey's HSD Test,  $p \leq 0,05$ ).

Wie in Abbildung 36 zu sehen, war diese Tendenz bereits durch die Dokumentation des Wachstums zu erkennen. Vor allem die Pflanzen in den Varianten PN, FN und GN waren seit Beginn der Messungen zum BBCH-Stadium 31 größer als die nur mit KAS gedüngten Pflanzen. Bei Mais und Weizen, zu denen keine kombinierte Ausbringung von Gärprodukten und Mineraldünger mehr erfolgte, zeigten sich keine Ertragsunterschiede mehr zwischen der ungedüngten Kontrolle und den Gärproduktvarianten AN, PN, FN und GN. Bei Mais wurde allerdings überhaupt nur durch die höchste Aufwandmenge von KAS ein signifikanter Mehrertrag gegenüber der ungedüngten Kontrolle erzielt.

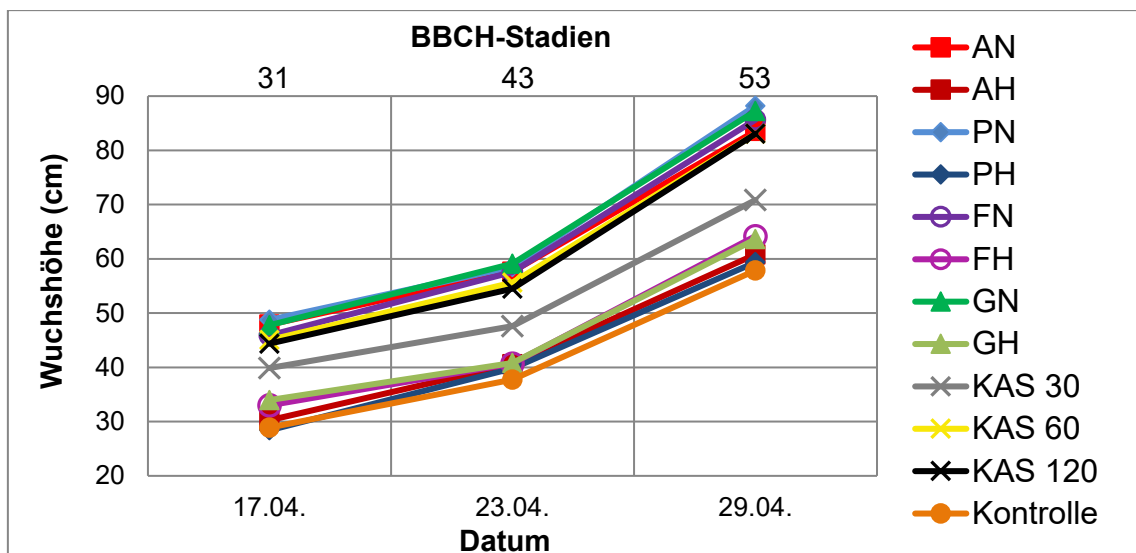


Abbildung 36: Entwicklung der Wuchshöhe von Roggen im Feldversuch im Jahr 2015

Zwischen allen anderen Varianten zeigten sich keine signifikanten Ertragsunterschiede. Dies deutete sich bereits während der Wachstumsphase an, während der erst an den letzten beiden Boniturterminen überhaupt nennenswerte Unterschiede der Wuchshöhe gemessen wurden (Abbildung 37). Die KAS 120-Variante hatte dabei mit rund 244 cm nicht die höchsten Pflanzen, was jedoch offensichtlich durch Blatt- bzw. Kolbenbiomasse ausgeglichen werden konnte. Die Erträge fielen mit max. 152,6 dt ha<sup>-1</sup> TM insgesamt eher niedrig aus (Lorenz und Maidl, 2005). Ursache für die niedrigen Erträge und die geringen Unterschiede zwischen den Varianten sind längere Phasen von Trockenheit im Jahr 2015, die in ganz Brandenburg zu niedrigen Silomaisserträgen geführt haben (Amt für Statistik Berlin-Brandenburg, 2015). Am Standort Berge waren die Niederschläge im Jahr 2015 in den Monaten Februar bis Mai durchgängig deutlich niedriger als der langjährige Durchschnitt (vergl. Abbildung 29).

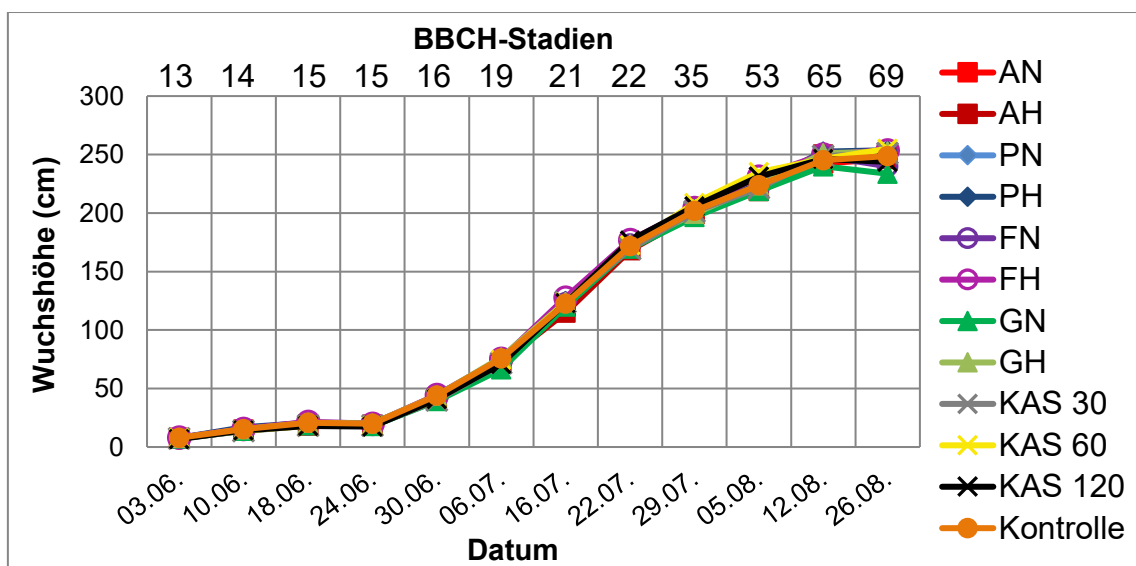


Abbildung 37: Entwicklung der Wuchshöhe von Mais im Feldversuch im Jahr 2015

Dieses Defizit konnte durch die Niederschläge in den Sommermonaten nicht ausgeglichen werden. Die Maiserträge sollten deswegen im Hinblick auf mögliche Düngewirkungen nur mit Vorsicht ausgewertet werden.

Die hohe Aufwandmenge an Gärprodukten (AH, PH, FH und GH) führte bei Senf, Roggen und Mais zu keinen von der Kontrolle verschiedenen Erträgen. Erst bei Weizen war ein gegenüber der Kontrolle erhöhter Kornertrag zu verzeichnen, wobei der Unterschied nur zwischen Feinfraktion und Kontrolle auch statistisch signifikant war (Kornertrag fortan angegeben mit 86 % TS). Mit 43,0 dt ha<sup>-1</sup> erzielte die Feinfraktion Kornerträge, die sich auf gleichem Niveau bewegten wie die der KAS 30-Variante (48,1 dt ha<sup>-1</sup>). Obwohl also in den Varianten AH, PH, FH und GH zwei Mal pro Jahr Gärprodukte in Mengen entsprechend 200 kg ha<sup>-1</sup> Stickstoff ausgebracht wurden, zeigte sich ein messbarer Düngeeffekt erst im dritten Versuchsjahr. Im Feldversuch bestätigte sich somit die bereits in Kapitel 3.4 diskutierte geringe Verfügbarkeit von Stickstoff in Kompost- bzw. Gärprodukten aus Haushaltsabfällen. Dies wird auch dadurch verdeutlicht, dass bei Mais und Weizen keine signifikanten Ertragsunterschiede zwischen der niedrigen und der hohen Aufwandmenge an Gärprodukten festgestellt werden konnten, obwohl die hohe Aufwandmenge eine Verdopplung der ausgebrachten Stickstoffmenge bedeutete.

Die geringe Stickstoffverfügbarkeit aus den Gärprodukten zeigte sich auch durch die Blattgrünwerte der damit gedüngten Pflanzen. Bei Roggen bildeten sich von Beginn der Messungen an zwei Gruppen heraus, wobei zu der weniger grünen Gruppe die Varianten AH, PH, FH und GH sowie die ungedüngte Kontrolle gehörten, und zur zweiten, grüneren Gruppe die KAS-Varianten sowie die Varianten mit einer Kombination aus KAS- und Gärprodukt-Düngung (Abbildung 38).

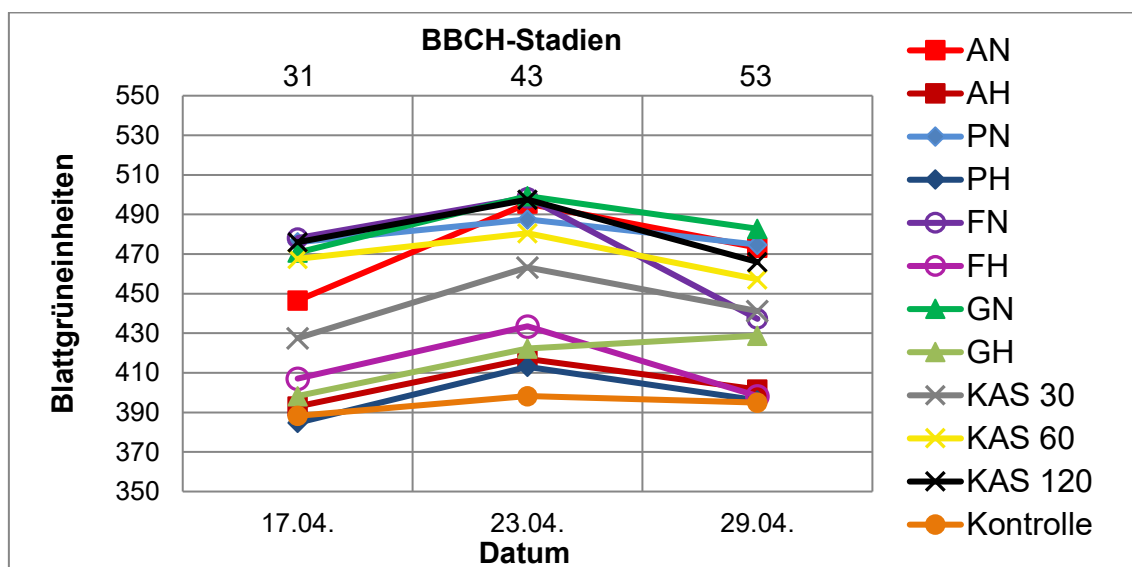


Abbildung 38: Entwicklung des Blattgrüns bei Roggen im Feldversuch im Jahr 2015

Zwischen diesen beiden Gruppen lag die KAS 30-Variante. Bei allen Düngervarianten zeigte sich bis zum BBCH-Stadium 43 ein Anstieg der Blattgrünmesswerte, gefolgt von einem Absinken zum Ende der Messungen, das vermutlich vor allem durch die große Biomasseentwicklung bei nicht ausreichender N-Nachlieferung in diesem Zeitraum verursacht wurde. Zum letzten Boniturtermin sanken die Werte der Varianten FH, AH, und PH auf im Mittel 399 und damit auf das Niveau der

ungedüngten Kontrolle (395) ab. Die Variante GH war mit einem Endwert von 429 etwas grüner, allerdings immer noch weniger grün als die KAS 30-Variante (441). Die Varianten AN, PN und GN mit Gärprodukt-Mineraldünger-Kombination waren mit 473, 475 bzw. 483 zum letzten Termin grüner als die vergleichbare Variante KAS 120 (466). Nur bei FN zeigte sich ein Abfall der Werte von 499 zum zweiten Termin auf 437 am letzten Termin.

Bei Mais zeigten sich bis Ende Juni (BBCH-Stadium 16) keine eindeutigen Unterschiede zwischen den Varianten (Abbildung 39). Ab Anfang Juli waren die mit KAS 60 und KAS 120 gedüngten Pflanzen grüner als die in allen anderen Varianten.

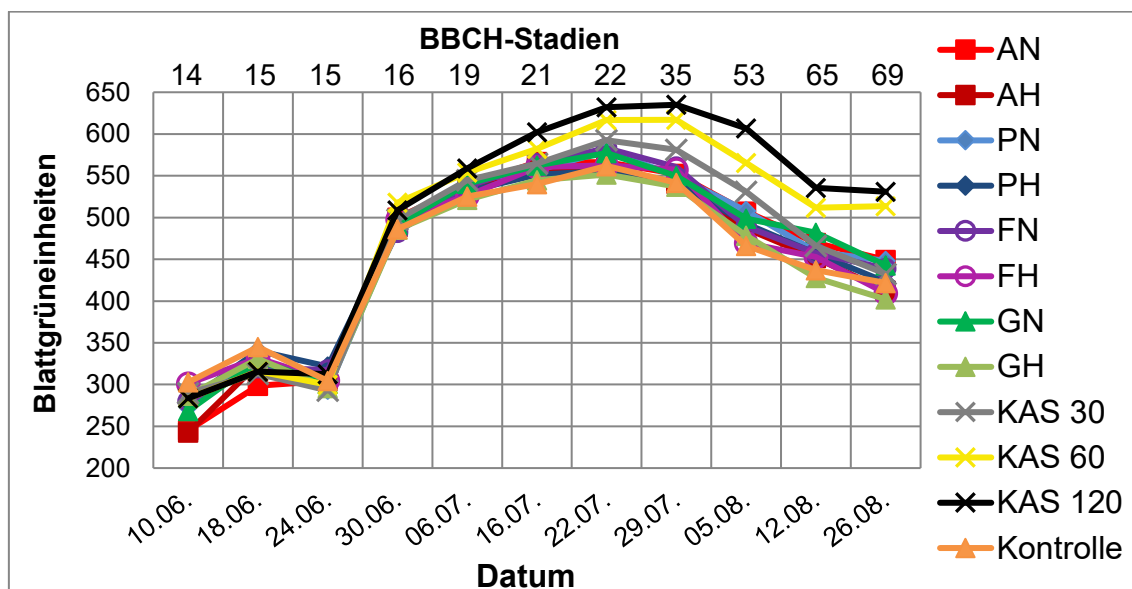


Abbildung 39: Entwicklung des Blattgrüns bei Mais im Feldversuch im Jahr 2015

Ab Ende Juli fielen die Messwerte bei allen Varianten ab, was vermutlich durch eine Kombination aus dem oben beschriebenen Wassermangel und Umverteilungsprozessen in der Pflanze während der Blüte und der Kolbenbildung ausgelöst wurde. Am letzten Boniturtermin wiesen die Gärprodukt-Varianten Blattgrünwerte zwischen 402 (GH) und 449 (AN) auf. Die niedrigen Aufwandmengen der einzelnen Gärprodukte führten jeweils zu etwas höheren Blattgrünwerten als die hohen Aufwandmengen. Hier wurden vermutlich Stickstoffreserven mineralisiert, die nach den beiden Ausbringungen im Vorjahr, zu denen noch eine Kombination aus Mineraldüngung und Gärprodukten erfolgt war, in Ernteresten im Boden vorhanden waren. Auswirkungen auf den Ertrag hatte dies jedoch wie oben beschrieben nicht.

Auch bei Weizen waren die Pflanzen der Varianten KAS 60 und KAS 120 von Beginn an grüner als die mit Gärprodukten versorgten Pflanzen. Während bei den KAS 60-Pflanzen allerdings ab der Blüte ein Absinken der Werte auf 471 und damit fast bis auf das Niveau der Kontrolle (462) zu beobachten war, verblieben die Werte der KAS 120-Variante auch nach der Blüte auf einem vergleichsweise hohen Niveau und sanken nur auf 657 (Abbildung 40). Die Gärproduktvarianten starteten am ersten Boniturtermin mit Blattgrünmesswerten, die mit 319 (AH) bis 375 (GH) durchweg geringer waren als die niedrigste Mineraldünger-Variante KAS 30 (407). Ab Ende Mai (BBCH 39) glichen sie sich dieser an. Am letzten Termin waren die KAS 30-Pflanzen mit 398 weniger

grün als alle Gärprodukt-Pflanzen und auch weniger grün als zu Beginn der Messungen. Bei den Gärprodukten fielen die Werte nach der Blüte nicht ganz so stark ab wie bei KAS 30 und KAS 60. Die Endwerte waren mit 437 (GN) bis 465 (FH) höher als die Ausgangswerte. Dies lässt darauf schließen, dass mit einiger Verzögerung im Laufe der Vegetationsperiode ein Teil des in den Gärprodukten enthaltenen Stickstoffs mineralisiert und pflanzenverfügbar gemacht wird.

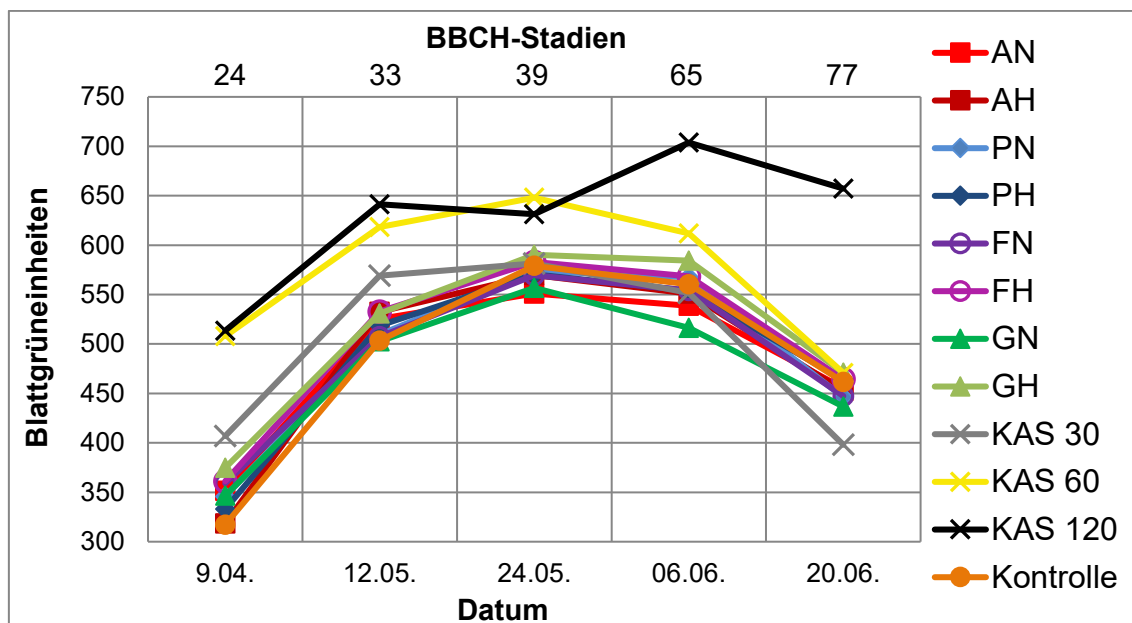


Abbildung 40: Entwicklung des Blattgrüns bei Weizen im Feldversuch im Jahr 2016

Die Blattgrünmesswerte von Weizen finden ihre Entsprechung in Ertrag und Ertragsstruktur (Tabelle 50). Die höchsten Kornerträge wurden mit 68,4 und 80,7 dt ha<sup>-1</sup> in den KAS 60- und KAS 120-Varianten verzeichnet. Innerhalb der Gruppe der Gärprodukte wurden die höchsten Erträge mit 43,0 dt ha<sup>-1</sup> durch die Anwendung der Feinfraktion in der hohen Aufwandmenge erzielt. Entscheidend für den Mehrertrag der FH-Variante im Vergleich zu den anderen Gärproduktvarianten war die Anzahl der ährentragenden Halme je Quadratmeter.

Tabelle 50: Ertrag (86 % TS), Ertragsstruktur und Proteingehalt von Winterweizen im Feldversuch im Jahr 2016. Daten sind Mittelwerte aus vier Wiederholungen  $\pm$  Standardabweichung. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer Spalte (Tukey's HSD Test,  $p \leq 0,05$ ).

| Variante  | Kornertrag (dt ha <sup>-1</sup> ) | Korn-Stroh-Verhältnis        | Ährentragende Halme je m <sup>2</sup> | Körner je Ähre               | TKG (g)                     | Proteingehalt (%)           |
|-----------|-----------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| AN        | 39,2 $\pm$ 2,0 <sup>ab</sup>      | 0,78 $\pm$ 0,05 <sup>a</sup> | 292,8 $\pm$ 44,8 <sup>a</sup>         | 25,1 $\pm$ 2,9 <sup>b</sup>  | 46,7 $\pm$ 1,8 <sup>a</sup> | 8,4 $\pm$ 0,6 <sup>a</sup>  |
| AH        | 40,4 $\pm$ 2,5 <sup>ab</sup>      | 0,79 $\pm$ 0,08 <sup>a</sup> | 308,1 $\pm$ 43,1 <sup>a</sup>         | 24,2 $\pm$ 2,6 <sup>ab</sup> | 47,3 $\pm$ 1,5 <sup>a</sup> | 7,9 $\pm$ 0,5 <sup>a</sup>  |
| PN        | 39,3 $\pm$ 6,2 <sup>ab</sup>      | 0,74 $\pm$ 0,08 <sup>a</sup> | 315,0 $\pm$ 55,6 <sup>a</sup>         | 24,3 $\pm$ 6,2 <sup>ab</sup> | 46,3 $\pm$ 0,8 <sup>a</sup> | 8,5 $\pm$ 0,7 <sup>a</sup>  |
| PH        | 39,8 $\pm$ 6,3 <sup>ab</sup>      | 0,80 $\pm$ 0,01 <sup>a</sup> | 298,9 $\pm$ 40,2 <sup>a</sup>         | 24,6 $\pm$ 3,1 <sup>ab</sup> | 47,6 $\pm$ 0,9 <sup>a</sup> | 8,3 $\pm$ 0,6 <sup>a</sup>  |
| FN        | 38,9 $\pm$ 5,4 <sup>ab</sup>      | 0,85 $\pm$ 0,11 <sup>a</sup> | 315,7 $\pm$ 35,9 <sup>a</sup>         | 22,3 $\pm$ 1,4 <sup>ab</sup> | 47,1 $\pm$ 1,7 <sup>a</sup> | 8,3 $\pm$ 0,9 <sup>a</sup>  |
| FH        | 43,0 $\pm$ 4,4 <sup>b</sup>       | 0,70 $\pm$ 0,17 <sup>a</sup> | 340,2 $\pm$ 25,8 <sup>a</sup>         | 23,2 $\pm$ 1,5 <sup>ab</sup> | 47,6 $\pm$ 0,5 <sup>a</sup> | 8,1 $\pm$ 0,5 <sup>a</sup>  |
| GN        | 38,5 $\pm$ 5,5 <sup>ab</sup>      | 0,73 $\pm$ 0,07 <sup>a</sup> | 302,0 $\pm$ 33,3 <sup>a</sup>         | 23,5 $\pm$ 2,5 <sup>ab</sup> | 46,2 $\pm$ 0,3 <sup>a</sup> | 8,3 $\pm$ 0,7 <sup>a</sup>  |
| GH        | 40,5 $\pm$ 4,2 <sup>ab</sup>      | 0,77 $\pm$ 0,06 <sup>a</sup> | 298,9 $\pm$ 11,8 <sup>a</sup>         | 24,7 $\pm$ 2,0 <sup>ab</sup> | 47,4 $\pm$ 0,4 <sup>a</sup> | 8,4 $\pm$ 0,4 <sup>a</sup>  |
| KAS 30    | 48,1 $\pm$ 6,0 <sup>b</sup>       | 0,98 $\pm$ 0,26 <sup>a</sup> | 341,7 $\pm$ 23,3 <sup>a</sup>         | 26,8 $\pm$ 2,8 <sup>b</sup>  | 45,9 $\pm$ 1,2 <sup>a</sup> | 7,7 $\pm$ 0,3 <sup>a</sup>  |
| KAS 60    | 68,4 $\pm$ 0,3 <sup>c</sup>       | 0,86 $\pm$ 0,07 <sup>a</sup> | 477,8 $\pm$ 49,5 <sup>b</sup>         | 27,0 $\pm$ 3,9 <sup>b</sup>  | 46,6 $\pm$ 1,2 <sup>a</sup> | 7,5 $\pm$ 0,1 <sup>a</sup>  |
| KAS 120   | 80,7 $\pm$ 3,9 <sup>d</sup>       | 0,82 $\pm$ 0,11 <sup>a</sup> | 538,2 $\pm$ 19,8 <sup>b</sup>         | 25,4 $\pm$ 2,0 <sup>b</sup>  | 50,9 $\pm$ 0,5 <sup>b</sup> | 11,4 $\pm$ 0,4 <sup>b</sup> |
| Kontrolle | 31,2 $\pm$ 2,9 <sup>a</sup>       | 0,86 $\pm$ 0,13 <sup>a</sup> | 342,5 $\pm$ 28,1 <sup>a</sup>         | 17,5 $\pm$ 0,6 <sup>a</sup>  | 45,4 $\pm$ 1,6 <sup>a</sup> | 8,5 $\pm$ 0,5 <sup>a</sup>  |

Der höhere Ertrag in den KAS-Varianten beruhte demgegenüber auf der Anzahl der Körner je Ähre, sowie für KAS 60 und KAS 120 auch auf der Bestandesdichte und für KAS 120 zusätzlich

auch auf dem höheren Tausendkorngewicht. Die aus den Blattgrünmesswerten ersichtliche durchgängig bessere und am längsten vorhaltende Stickstoffversorgung der KAS 120-Varianten beeinflusste also alle Ertragsparameter positiv. Die im Vergleich zur KAS 30-Variante etwas länger anhaltende Grünfärbung der mit Gärprodukten gedüngten Pflanzen führte zu einer leichten Erhöhung des Tausendkorngewichtes. Dies konnte jedoch mit Ausnahme von FH die geringere Anzahl ährentragender Halme und Körner je Ähre nicht ausgleichen. Das Korn-Stroh-Verhältnis war in den reinen KAS-Varianten und bei FN tendenziell größer als in den anderen Varianten. Statistisch signifikant waren diese Unterschiede jedoch nicht.

Bei der im Feldversuch angebauten Weizensorte handelte es sich um die A-Weizensorte „Julius“ (KWS Saat), die sich durch gute Kornerträge und ausgeprägte Winterhärte auszeichnet, in der Regel aber nur niedrige bis mittlere Proteingehalte aufweist (Bundessortenamt, 2016). Letzteres bestätigte sich im Feldversuch. Selbst in der KAS 120-Variante erreichten die Proteingehalte mit 11,4 % nicht die für A-Weizen geforderten 13 % und auch nicht die für Brotweizen mindestens geforderten 12 % (Reisewitz und Plötzky, 2007; Schneeweiß, 2013). Alle anderen Varianten blieben mit 7,5 bis 8,5 % aufgrund der mangelnden N-Versorgung während der Kornfüllungsphase weit darunter.

#### *Gehalte an Stickstoff, Phosphor und Kalium im Pflanzenmaterial*

Die Gehalte an Stickstoff, Phosphor und Kalium im Pflanzenmaterial sind in Tabelle 51 dargestellt. Vergleicht man diese Nährstoffgehalte in den Pflanzen mit in der Literatur angegebenen Richtwerten (Tabelle A 7), so kommt man zu folgenden Feststellungen: Bei Senf, Mais, Weizenkorn und Weizenstroh wurden die höchsten Stickstoffgehalte mit 36,83; 11,43; 20,07 bzw. 4,32 g kg<sup>-1</sup> jeweils in den KAS 120-Varianten gefunden. Bei Senf und Weizen waren dies auch die einzigen Varianten, die sich signifikant von der Kontrolle unterschieden. Bei Mais trifft dies zusätzlich auch auf die KAS 60-Variante (8,88 g kg<sup>-1</sup>) zu. Bei Roggen wurden mit 24,32 g kg<sup>-1</sup> die höchsten N-Gehalte in den FN-Pflanzen gemessen. Alle Gärprodukte der niedrigen Aufwandmenge (in Kombination mit KAS) mit Ausnahme der Pellets führten bei Roggen zu signifikant höheren N-Gehalten als die Kontrolle und zu tendenziell höheren Gehalten als die KAS 30-Variante. Die hohe Aufwandmenge an Gärprodukten (ohne Kombination mit KAS) führte bei keiner der geprüften Kulturen zu von der Kontrolle signifikant verschiedenen N-Gehalten. Die Stickstoffgehalte von Senf und Roggen lagen in allen Varianten deutlich über den Richtwerten, die zum Beispiel zur Berechnung von Hoftorbilanzen angewendet werden. Bei Mais und Weizen wurden die Richtwerte dagegen nur in den mit KAS 120 gedüngten Pflanzen annähernd erreicht, während die Gehalte in den anderen Varianten deutlich darunter blieben. Dies ist zusätzlich zu den erzielten niedrigen Erträgen ein weiterer Hinweis darauf, dass die Stickstoffversorgung der Pflanzen spätestens im zweiten Jahr in den nur mit Gärprodukten versorgten Parzellen nicht ausreichend war.



Tabelle 51: Nährelementgehalte im Erntegut (g kg<sup>-1</sup> TM) im Feldversuch. Daten sind Mittelwerte aus vier Wiederholungen ± Standardabweichung. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer Spalte für das jeweilige Nährelement (Tukey's HSD Test, p ≤ 0,05).

| Nährelement | Variante  | Gehalte (g kg <sup>-1</sup> TM) in |                               |                               |                            |                            |
|-------------|-----------|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|
|             |           | Senf                               | Roggen                        | Mais                          | Weizen Korn                | Weizen Stroh               |
| Stickstoff  | AN        | 34,78 ± 8,33 <sup>ab</sup>         | 22,27 ± 1,54 <sup>de</sup>    | 7,61 ± 0,70 <sup>abc</sup>    | 14,72 ± 1,07 <sup>a</sup>  | 3,07 ± 0,40 <sup>ab</sup>  |
|             | AH        | 24,99 ± 2,28 <sup>a</sup>          | 17,23 ± 0,74 <sup>abc</sup>   | 6,45 ± 1,25 <sup>ab</sup>     | 13,92 ± 0,80 <sup>a</sup>  | 2,43 ± 0,82 <sup>ab</sup>  |
|             | PN        | 33,05 ± 5,19 <sup>ab</sup>         | 21,17 ± 0,92 <sup>abcde</sup> | 8,11 ± 0,72 <sup>bc</sup>     | 14,97 ± 1,20 <sup>a</sup>  | 3,23 ± 0,75 <sup>ab</sup>  |
|             | PH        | 27,34 ± 1,82 <sup>ab</sup>         | 17,69 ± 0,84 <sup>abcd</sup>  | 6,42 ± 1,19 <sup>ab</sup>     | 14,52 ± 0,98 <sup>a</sup>  | 2,75 ± 0,58 <sup>ab</sup>  |
|             | FN        | 33,70 ± 4,43 <sup>ab</sup>         | 24,32 ± 3,56 <sup>e</sup>     | 7,45 ± 0,78 <sup>abc</sup>    | 14,53 ± 1,51 <sup>a</sup>  | 2,84 ± 0,93 <sup>ab</sup>  |
|             | FH        | 25,72 ± 4,24 <sup>a</sup>          | 17,09 ± 2,44 <sup>ab</sup>    | 6,66 ± 0,36 <sup>abc</sup>    | 14,19 ± 0,84 <sup>a</sup>  | 2,84 ± 1,03 <sup>ab</sup>  |
|             | GN        | 30,34 ± 5,35 <sup>ab</sup>         | 22,16 ± 1,04 <sup>cde</sup>   | 7,62 ± 0,73 <sup>abc</sup>    | 14,57 ± 1,20 <sup>a</sup>  | 3,10 ± 0,71 <sup>ab</sup>  |
|             | GH        | 26,07 ± 3,19 <sup>a</sup>          | 16,81 ± 2,18 <sup>ab</sup>    | 6,09 ± 1,06 <sup>ab</sup>     | 14,76 ± 0,64 <sup>a</sup>  | 2,65 ± 0,39 <sup>ab</sup>  |
|             | KAS 30    | 29,40 ± 1,08 <sup>ab</sup>         | 19,27 ± 2,98 <sup>abcd</sup>  | 7,47 ± 0,44 <sup>abc</sup>    | 13,44 ± 0,57 <sup>a</sup>  | 2,22 ± 0,47 <sup>a</sup>   |
|             | KAS 60    | 28,42 ± 3,43 <sup>ab</sup>         | 21,31 ± 1,56 <sup>bcde</sup>  | 8,88 ± 0,76 <sup>c</sup>      | 13,12 ± 0,12 <sup>a</sup>  | 2,54 ± 0,50 <sup>ab</sup>  |
|             | KAS 120   | 36,83 ± 4,69 <sup>b</sup>          | 21,70 ± 2,82 <sup>bcde</sup>  | 11,43 ± 1,35 <sup>d</sup>     | 20,07 ± 0,68 <sup>b</sup>  | 4,32 ± 1,16 <sup>b</sup>   |
|             | Kontrolle | 25,02 ± 2,26 <sup>a</sup>          | 16,28 ± 0,61 <sup>a</sup>     | 5,71 ± 1,04 <sup>a</sup>      | 14,99 ± 0,88 <sup>a</sup>  | 2,19 ± 1,09 <sup>a</sup>   |
| Phosphor    | AN        | 4,13 ± 0,05 <sup>abc</sup>         | 4,44 ± 0,41 <sup>a</sup>      | 3,04 ± 0,14 <sup>abc</sup>    | 4,62 ± 0,32 <sup>abc</sup> | 2,63 ± 0,42 <sup>abc</sup> |
|             | AH        | 4,56 ± 0,22 <sup>bc</sup>          | 3,82 ± 0,23 <sup>a</sup>      | 3,35 ± 0,26 <sup>c</sup>      | 4,59 ± 0,26 <sup>abc</sup> | 1,91 ± 0,39 <sup>c</sup>   |
|             | PN        | 4,20 ± 0,13 <sup>abc</sup>         | 4,31 ± 0,43 <sup>a</sup>      | 2,85 ± 0,51 <sup>abc</sup>    | 4,87 ± 0,18 <sup>bc</sup>  | 2,71 ± 0,36 <sup>c</sup>   |
|             | PH        | 4,47 ± 0,15 <sup>abc</sup>         | 3,92 ± 0,31 <sup>a</sup>      | 3,45 ± 0,29 <sup>c</sup>      | 4,76 ± 0,23 <sup>bc</sup>  | 2,28 ± 0,32 <sup>c</sup>   |
|             | FN        | 3,82 ± 0,47 <sup>a</sup>           | 4,32 ± 0,31 <sup>a</sup>      | 2,94 ± 0,13 <sup>abc</sup>    | 5,09 ± 0,18 <sup>c</sup>   | 2,32 ± 0,64 <sup>c</sup>   |
|             | FH        | 4,43 ± 0,16 <sup>abc</sup>         | 4,00 ± 0,38 <sup>a</sup>      | 3,17 ± 0,22 <sup>abc</sup>    | 4,71 ± 0,04 <sup>bc</sup>  | 2,16 ± 0,64 <sup>bc</sup>  |
|             | GN        | 4,10 ± 0,20 <sup>abc</sup>         | 4,32 ± 0,23 <sup>a</sup>      | 3,09 ± 0,37 <sup>abc</sup>    | 4,71 ± 0,32 <sup>bc</sup>  | 2,49 ± 0,74 <sup>c</sup>   |
|             | GH        | 4,68 ± 0,38 <sup>c</sup>           | 4,06 ± 0,13 <sup>a</sup>      | 3,25 ± 0,20 <sup>abc</sup>    | 4,86 ± 0,25 <sup>bc</sup>  | 2,26 ± 0,21 <sup>c</sup>   |
|             | KAS 30    | 4,41 ± 0,34 <sup>abc</sup>         | 4,27 ± 0,18 <sup>a</sup>      | 2,86 ± 0,19 <sup>abc</sup>    | 4,60 ± 0,20 <sup>abc</sup> | 1,62 ± 0,39 <sup>abc</sup> |
|             | KAS 60    | 4,21 ± 0,12 <sup>abc</sup>         | 4,35 ± 0,25 <sup>a</sup>      | 2,65 ± 0,11 <sup>ab</sup>     | 4,17 ± 0,07 <sup>a</sup>   | 1,06 ± 0,29 <sup>ab</sup>  |
|             | KAS 120   | 3,93 ± 0,33 <sup>ab</sup>          | 4,44 ± 0,39 <sup>a</sup>      | 2,61 ± 0,18 <sup>a</sup>      | 4,42 ± 0,20 <sup>ab</sup>  | 0,95 ± 0,24 <sup>a</sup>   |
|             | Kontrolle | 4,58 ± 0,24 <sup>c</sup>           | 3,89 ± 0,25 <sup>a</sup>      | 3,27 ± 0,28 <sup>bc</sup>     | 4,56 ± 0,22 <sup>abc</sup> | 2,18 ± 0,69 <sup>bc</sup>  |
| Kalium      | AN        | 31,75 ± 2,05 <sup>a</sup>          | 37,08 ± 1,91 <sup>d</sup>     | 12,72 ± 0,67 <sup>abcde</sup> | 5,87 ± 0,36 <sup>ab</sup>  | 15,51 ± 0,78 <sup>ab</sup> |
|             | AH        | 30,00 ± 1,87 <sup>a</sup>          | 26,10 ± 1,61 <sup>a</sup>     | 14,74 ± 1,07 <sup>e</sup>     | 5,85 ± 0,24 <sup>ab</sup>  | 14,25 ± 0,94 <sup>a</sup>  |
|             | PN        | 32,56 ± 2,48 <sup>a</sup>          | 35,31 ± 3,37 <sup>cd</sup>    | 11,23 ± 1,86 <sup>abc</sup>   | 5,81 ± 0,32 <sup>ab</sup>  | 14,78 ± 1,31 <sup>ab</sup> |
|             | PH        | 31,32 ± 1,07 <sup>a</sup>          | 26,30 ± 2,25 <sup>a</sup>     | 13,49 ± 0,54 <sup>cde</sup>   | 5,83 ± 0,05 <sup>ab</sup>  | 14,26 ± 1,35 <sup>a</sup>  |
|             | FN        | 32,19 ± 3,39 <sup>a</sup>          | 35,02 ± 2,80 <sup>cd</sup>    | 12,19 ± 0,32 <sup>abcd</sup>  | 6,18 ± 0,18 <sup>b</sup>   | 13,70 ± 2,05 <sup>a</sup>  |
|             | FH        | 31,18 ± 2,22 <sup>a</sup>          | 27,59 ± 3,38 <sup>ab</sup>    | 12,95 ± 1,37 <sup>bcde</sup>  | 5,90 ± 0,23 <sup>ab</sup>  | 13,95 ± 0,71 <sup>a</sup>  |
|             | GN        | 32,10 ± 0,75 <sup>a</sup>          | 34,96 ± 2,82 <sup>cd</sup>    | 12,39 ± 1,18 <sup>abcde</sup> | 5,99 ± 0,41 <sup>b</sup>   | 16,04 ± 1,12 <sup>ab</sup> |
|             | GH        | 31,01 ± 2,01 <sup>a</sup>          | 26,79 ± 1,43 <sup>a</sup>     | 14,22 ± 0,51 <sup>de</sup>    | 6,20 ± 0,16 <sup>b</sup>   | 14,94 ± 1,06 <sup>ab</sup> |
|             | KAS 30    | 32,56 ± 2,11 <sup>a</sup>          | 30,63 ± 2,91 <sup>abc</sup>   | 11,84 ± 0,83 <sup>abcd</sup>  | 6,09 ± 0,45 <sup>b</sup>   | 13,88 ± 1,17 <sup>a</sup>  |
|             | KAS 60    | 30,96 ± 1,60 <sup>a</sup>          | 33,38 ± 2,34 <sup>bcd</sup>   | 10,79 ± 1,16 <sup>ab</sup>    | 5,71 ± 0,23 <sup>ab</sup>  | 12,63 ± 1,35 <sup>a</sup>  |
|             | KAS 120   | 30,58 ± 2,09 <sup>a</sup>          | 33,50 ± 3,21 <sup>bcd</sup>   | 10,28 ± 0,90 <sup>a</sup>     | 5,29 ± 0,15 <sup>a</sup>   | 18,04 ± 2,75 <sup>b</sup>  |
|             | Kontrolle | 29,87 ± 2,77 <sup>a</sup>          | 25,61 ± 1,82 <sup>a</sup>     | 13,23 ± 0,74 <sup>bcde</sup>  | 5,92 ± 0,20 <sup>ab</sup>  | 15,79 ± 1,57 <sup>ab</sup> |

Bei den Phosphorgehalten wurden die Richtwerte in den mit Gärprodukten gedüngten Varianten bei allen Kulturarten erreicht oder überschritten. In der höchsten KAS-Variante war dies bei Senf, Roggen, Mais und beim Weizenkorn ebenfalls der Fall. Da hier keinerlei Phosphordüngung erfolgte, lässt dies auf ein erhebliches Phosphornachlieferungspotential aus dem Boden schließen, welches positive Effekte der zusätzlichen Phosphorzufuhr durch die Gärprodukte möglicherweise überdeckt. Die Gehalte im Pflanzenmaterial waren allerdings ab dem zweiten Versuchsjahr in den beiden hohen KAS-Varianten geringer als in den Gärproduktvarianten und blieben beim Weizenstroh sogar unter den Richtwerten. Die Phosphorgehalte des Pflanzenmaterials wurden vermutlich durch verschiedene Faktoren beeinflusst: Durch die mit den Gärprodukten ausgebrachten Mengen an Phosphor und durch die Stickstoffdüngung bzw. durch die dadurch bedingte Biomasseproduktion, sowie durch die Veränderung der bodenchemischen Eigenschaften durch die Gärprodukte. Betrachtet man die mit den Gärprodukten ausgebrachten (Tabelle 46) und die durch die Pflanzen entzogenen Mengen (Tabelle A6), so wird deutlich, dass durch Roggen, Mais und Weizen vor allem in den niedrigen Aufwandmengen deutlich mehr Phosphor aufgenommen wurde, als durch die jeweils letzte Gärprodukt-Anwendung ausgebracht worden war. Offensichtlich konnten hier im Boden vorhandene Phosphorreserven mobilisiert werden. Dies spiegelt sich auch in den Gehalten an pflanzenverfügbarem Phosphor im Boden wieder, die nach Mais im Vergleich zum Versuchsbeginn deutlich abgesunken waren. Gleichzeitig waren ab dem zweiten Versuchsjahr (bei Mais und Weizen) die Gehalte an Phosphor im Pflanzenmaterial in den Gärproduktvarianten größer als in den reinen Mineraldüngervarianten. Ursache hierfür ist zum einen die Reduktion der Gehalte an pflanzenverfügbarem Phosphor im Boden in den reinen KAS-Varianten aufgrund der hohen Aufnahmen durch Roggen und Mais. In diesen Parzellen sank im gleichen Zeitraum zudem der pH-Wert. Nach Weizen wurden in den Mineraldüngerparzellen pH-Werte unter 5,7 gemessen; bei KAS 120 sank der Wert auf 5,5 ab. Die Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor ist bei pH-Werten zwischen 6 und 7, wie sie in den Gärprodukt-Parzellen überwiegend gemessen wurden, am größten (Kuhlmann, 2001). Bei niedrigeren pH-Werten geht Phosphor jedoch schwer lösliche Verbindungen mit Eisen- und Aluminiumoxiden und Tonmineralen ein, wobei es vor allem in Form von  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  im Austausch gegen  $\text{OH}^-$ -Ionen gebunden wird (Raab, 2014; Blume *et al.*, 2010). Organische Materialien wie Gülle und Kompost können zudem, abgesehen von ihrer Beeinflussung des pH-Wertes, die Verfügbarkeit von Phosphor zusätzlich erhöhen, weil aus der organischen Substanz stammende organische Anionen sorbierte Phosphate desorbieren bzw. durch Fe- und Al-Komplexierung mobilisieren können (Blume *et al.*, 2010). Die Veränderung des pH-Wertes und die Mobilisierung von im Boden vorhandenen Phosphor spielte vermutlich eine größere Rolle als die tatsächlich ausgebrachten Mengen an Phosphor, denn zwischen der niedrigen und der hohen Aufwandmenge an Gärprodukten waren beim Phosphorgehalt in keiner der Kulturen signifikante Unterschiede festzustellen. Die Phosphorentzüge (vergl. Tabelle A6) fielen bei Senf und Roggen aufgrund der höheren Erträge dank der zusätzlichen KAS-Düngung in den niedrigen Aufwandmengen höher aus als in den hohen Aufwandmengen. Bei Mais und Weizen (Wegfall der zusätzlichen KAS-Düngung) waren auch beim Phosphorentzug keine Unterschiede zwischen den Aufwandmengen mehr festzustellen.

Die Kaliumgehalte überstiegen bei Senf und Roggen die Richtwerte deutlich und erreichten diese bei Mais und Weizen in fast allen Varianten. Die Grunddüngung mit Kalium im Versuch erschwert allerdings eine Auswertung der Gehalte im Pflanzenmaterial. Mögliche Effekte durch die Anwendung der Gärprodukte wurden vermutlich weitgehend überdeckt. Bei Mais, zu dem keine zusätzliche Kaliumdüngung erfolgte, zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen den mit hohen Aufwandsmengen an Gärprodukten und den mit KAS gedüngten Pflanzen, wobei letztere deutlich niedrigere Kaliumgehalte aufwiesen. Hier zeigte sich möglicherweise eine Auswirkung der Kaliumzufuhr durch die Gärprodukte.

### 3.6.3.3 Schwermetalle

Laut Bioabfall-Verordnung dürfen durch Bioabfallprodukte innerhalb von drei Jahren maximal 30 g ha<sup>-1</sup> Cadmium, 2100 g ha<sup>-1</sup> Chrom, 2100 g ha<sup>-1</sup> Kupfer und 3000 g ha<sup>-1</sup> Blei ausgebracht werden. In der niedrigen Aufwandmenge wurden diese Grenzwerte weitgehend eingehalten (Tabelle 52). Durch die hohe Aufwandmenge wurden die Grenzwerte bei Cadmium und Blei durch alle Gärprodukte überschritten, bei Chrom durch Pellets und Grobfraktion und bei Kupfer durch Agglomerate und Pellets.

Tabelle 52: Ausgebrachte Mengen an Schwermetallen in Summe aller vier Ausbringungen. Überschreitungen der durch die BioAbfV vorgegebenen Grenzwerte sind rot markiert.

| Gärprodukt               | Cadmium  | Chrom  | Kupfer | Blei   |
|--------------------------|--|--------|--------|--------|
|                          | g ha <sup>-1</sup>                                 |        |        |        |
| AN                       | 24,2   | 829,0  | 1068,8 | 3405,9 |
| AH                       | 48,3   | 1657,9 | 2137,6 | 6811,8 |
| PN                       | 25,1   | 1150,3 | 1599,8 | 2392,0 |
| PH                       | 50,2   | 2300,6 | 3199,6 | 4783,9 |
| FN                       | 25,1   | 723,5  | 954,9  | 2026,0 |
| FH                       | 50,1   | 1447,0 | 1909,8 | 4051,9 |
| GN                       | 22,7   | 1340,5 | 945,3  | 1871,1 |
| GH                       | 45,4   | 2681,1 | 1890,5 | 3742,1 |
| <b>Produktmenge</b>      | <b>Grenzwerte laut BioAbfV (g ha<sup>-1</sup>)</b> |        |        |        |
| 20 t ha <sup>-1</sup> TM | 30,0   | 2000,0 | 2000,0 | 3000,0 |
| 30 t ha <sup>-1</sup> TM | 30,0   | 2100,0 | 2100,0 | 3000,0 |

Wie Tabelle 53 zu entnehmen, wurden die Schwermetallgehalte im Boden trotzdem durch die Ausbringung der Gärprodukte im Vergleich zur ungedüngten Kontrolle nicht signifikant verändert. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von Erhart *et al.* (2008), die in einem ähnlichen Feldversuch nach 10-jähriger Applikation von kompostierten Bioabfällen keinen signifikanten Anstieg der Gehalte an Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel oder Blei im Boden beobachteten. Illera *et al.* (2000) und Perez *et al.* (2007) berichteten demgegenüber von einem deutlichen Anstieg der Gehalte an verschiedenen Schwermetallen im Boden nach der Ausbringung von kompostierten Abfällen. Verschiedene Faktoren wie die Dauer des Kompostierungsprozesses, der pH-Wert von Boden und Kompost, die Anwesenheit von Chelatoren und der Grad der Komplexbildung mit der organischen Substanz beeinflussen, in wie weit die Konzentration der Schwermetalle im Boden durch die Ausbringung von Bioabfallkomposten verändert wird (Achiba *et al.*, 2009; Ernst, 1996; Puschenreiter *et al.*, 2005; Smith, 2009). Mitverantwortlich für die geringen Unterschiede zwischen den Varianten sind eventuell auch die schon beschriebenen Probleme mit der Probenahme

und -aufbereitung, die dazu führen, dass Teile der ausgebrachten Schwermetalle nicht in die Analysen eingegangen sind. Festzustellen ist aber, dass in keinem Fall die Vorsorgewerte des Bundes-Bodenschutzgesetzes überschritten wurden. Diese betragen für sandige Böden maximal  $0,4 \mu\text{g g}^{-1}$  Cd,  $30 \mu\text{g g}^{-1}$  Cr,  $20 \mu\text{g g}^{-1}$  Cu und  $40 \mu\text{g g}^{-1}$  Blei (BBodSchV, 1999).

Tabelle 53: Schwermetallgehalte im Boden im Oktober 2015 und August 2016. Daten sind Mittelwerte aus vier Wiederholungen  $\pm$  Standardabweichung. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer Spalte für den jeweiligen Probenahmezeitpunkt (Tukey's HSD Test,  $p \leq 0,05$ ).

| Variante     | Cadmium                  | Chrom                     | Kupfer                    | Blei                      |
|--------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
|              | µg g <sup>-1</sup>       |                           |                           |                           |
| Oktober 2015 |                          |                           |                           |                           |
| AN           | 0,36 ± 0,01 <sup>a</sup> | 12,61 ± 0,17 <sup>a</sup> | 10,02 ± 1,51 <sup>a</sup> | 14,82 ± 0,33 <sup>a</sup> |
| AH           | 0,37 ± 0,01 <sup>a</sup> | 13,08 ± 0,78 <sup>a</sup> | 10,60 ± 0,84 <sup>a</sup> | 16,10 ± 2,21 <sup>a</sup> |
| PN           | 0,37 ± 0,02 <sup>a</sup> | 13,08 ± 1,00 <sup>a</sup> | 10,60 ± 1,30 <sup>a</sup> | 16,10 ± 1,17 <sup>a</sup> |
| PH           | 0,37 ± 0,01 <sup>a</sup> | 12,78 ± 0,87 <sup>a</sup> | 10,04 ± 0,26 <sup>a</sup> | 15,28 ± 0,28 <sup>a</sup> |
| FN           | 0,37 ± 0,01 <sup>a</sup> | 13,18 ± 0,86 <sup>a</sup> | 9,64 ± 0,91 <sup>a</sup>  | 14,88 ± 0,42 <sup>a</sup> |
| FH           | 0,36 ± 0,02 <sup>a</sup> | 13,57 ± 2,85 <sup>a</sup> | 10,20 ± 1,18 <sup>a</sup> | 14,73 ± 0,77 <sup>a</sup> |
| GN           | 0,35 ± 0,01 <sup>a</sup> | 13,40 ± 1,68 <sup>a</sup> | 6,84 ± 1,46 <sup>a</sup>  | 14,26 ± 1,00 <sup>a</sup> |
| GH           | 0,38 ± 0,02 <sup>a</sup> | 13,00 ± 0,92 <sup>a</sup> | 7,21 ± 1,25 <sup>a</sup>  | 15,38 ± 0,87 <sup>a</sup> |
| KAS 30       | 0,35 ± 0,01 <sup>a</sup> | 13,83 ± 2,16 <sup>a</sup> | 6,72 ± 1,10 <sup>a</sup>  | 14,27 ± 0,67 <sup>a</sup> |
| KAS 60       | 0,35 ± 0,04 <sup>a</sup> | 11,84 ± 1,53 <sup>a</sup> | 7,38 ± 2,10 <sup>a</sup>  | 14,34 ± 1,68 <sup>a</sup> |
| KAS 120      | 0,36 ± 0,03 <sup>a</sup> | 12,69 ± 1,64 <sup>a</sup> | 7,08 ± 0,44 <sup>a</sup>  | 16,07 ± 2,71 <sup>a</sup> |
| Kontrolle    | 0,35 ± 0,02 <sup>a</sup> | 12,63 ± 1,08 <sup>a</sup> | 8,66 ± 0,97 <sup>a</sup>  | 14,60 ± 0,89 <sup>a</sup> |
| August 2016  |                          |                           |                           |                           |
| AN           | 0,29 ± 0,01 <sup>a</sup> | 9,94 ± 1,25 <sup>a</sup>  | 11,97 ± 1,09 <sup>a</sup> | 12,13 ± 0,41 <sup>a</sup> |
| AH           | 0,30 ± 0,02 <sup>a</sup> | 10,04 ± 0,82 <sup>a</sup> | 12,23 ± 1,69 <sup>a</sup> | 12,31 ± 0,51 <sup>a</sup> |
| PN           | 0,30 ± 0,01 <sup>a</sup> | 10,04 ± 1,37 <sup>a</sup> | 12,23 ± 1,96 <sup>a</sup> | 12,31 ± 0,37 <sup>a</sup> |
| PH           | 0,31 ± 0,03 <sup>a</sup> | 12,64 ± 4,06 <sup>a</sup> | 13,89 ± 3,78 <sup>a</sup> | 11,95 ± 0,53 <sup>a</sup> |
| FN           | 0,32 ± 0,02 <sup>a</sup> | 14,47 ± 6,70 <sup>a</sup> | 14,22 ± 0,50 <sup>a</sup> | 12,34 ± 0,71 <sup>a</sup> |
| FH           | 0,30 ± 0,02 <sup>a</sup> | 12,30 ± 4,68 <sup>a</sup> | 11,53 ± 0,54 <sup>a</sup> | 12,05 ± 0,81 <sup>a</sup> |
| GN           | 0,31 ± 0,01 <sup>a</sup> | 10,40 ± 0,92 <sup>a</sup> | 15,75 ± 2,14 <sup>a</sup> | 11,37 ± 0,71 <sup>a</sup> |
| GH           | 0,32 ± 0,02 <sup>a</sup> | 11,29 ± 0,87 <sup>a</sup> | 12,30 ± 2,51 <sup>a</sup> | 12,27 ± 0,45 <sup>a</sup> |
| KAS 30       | 0,33 ± 0,03 <sup>a</sup> | 9,80 ± 1,44 <sup>a</sup>  | 13,82 ± 3,36 <sup>a</sup> | 12,22 ± 0,48 <sup>a</sup> |
| KAS 60       | 0,33 ± 0,03 <sup>a</sup> | 9,98 ± 1,26 <sup>a</sup>  | 11,83 ± 1,71 <sup>a</sup> | 11,93 ± 1,30 <sup>a</sup> |
| KAS 120      | 0,31 ± 0,02 <sup>a</sup> | 11,11 ± 1,58 <sup>a</sup> | 11,76 ± 0,90 <sup>a</sup> | 11,51 ± 0,69 <sup>a</sup> |
| Kontrolle    | 0,30 ± 0,01 <sup>a</sup> | 10,83 ± 0,96 <sup>a</sup> | 11,51 ± 0,81 <sup>a</sup> | 11,76 ± 0,71 <sup>a</sup> |

Auffällig ist, dass die Gehalte an Cadmium, Chrom und Blei von Herbst 2015 bis Sommer 2016 in allen Parzellen abnahmen, während die Kupfergehalte in allen Parzellen anstiegen. Möglicherweise hat auch bei Kupfer durch die hohen Niederschläge ein Austrag in die Kontrollparzellen bzw. die ausschließlich mit KAS gedüngten Parzellen stattgefunden. Der Entzug durch die Pflanzen spielt im Vergleich dazu in Bezug auf die Bodengehalte nur eine untergeordnete Rolle. In Tabelle 54 sind die Schwermetallgehalte in den Pflanzen dargestellt. Cadmium und Blei wurden nur durch Roggen und Mais und nur in sehr geringen Mengen aufgenommen. Die Gehalte betrugen jeweils unter  $1 \mu\text{g g}^{-1}$ . Unterschiede zwischen den Varianten wurden nicht festgestellt. Cadmium wird in der Regel leicht von Pflanzen aufgenommen und verursacht schon in kleinen Mengen sichtbare Symptome. Die Verteilung des Cadmiums in der Pflanze unterliegt allerdings erheblichen genotypischen Unterschieden (Schubert, 2011). Mais akkumuliert Cadmium vor allem in den Zellen der Endodermis und dem Parenchym der Wurzeln, die hier nicht untersucht wurden (Wójcik und Tukiendorf, 2005; Petruzzelli *et al.*, 1989). Das gleiche gilt für Triticale und Weizen, bei denen allerdings üblicherweise deutliche Unterschiede zwischen den Gehalten im Korn und

im Stroh bestehen (Ciecko *et al.*, 2001; Schubert, 2011); ein Effekt, der bei Weizen im vorliegenden Versuch nicht nachgewiesen werden konnte.

Tabelle 54: Schwermetallgehalte im Erntegut von Roggen, Mais und Weizen im Feldversuch. Daten sind Mittelwerte aus vier Wiederholungen  $\pm$  Standardabweichung. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer Spalte für das jeweilige Pflanzenmaterial (Tukey's HSD Test,  $p \leq 0,05$ ).

| Pflanzenmaterial | Variante  | Cadmium              | Chrom                | Kupfer               | Blei              |
|------------------|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------|
|                  |           | $\mu\text{g g}^{-1}$ |                      |                      |                   |
| Roggen           | AN        | $0,03 \pm 0,01^a$    | $0,70 \pm 0,12^a$    | $8,26 \pm 1,06^{ab}$ | $0,39 \pm 0,09^a$ |
|                  | AH        | $0,01 \pm 0,01^a$    | $0,75 \pm 0,17^a$    | $6,76 \pm 0,72^a$    | $0,34 \pm 0,09^a$ |
|                  | PN        | $0,02 \pm 0,01^a$    | $0,68 \pm 0,10^a$    | $7,48 \pm 0,67^{ab}$ | $0,34 \pm 0,03^a$ |
|                  | PH        | $0,01 \pm 0,01^a$    | $0,71 \pm 0,05^a$    | $7,74 \pm 0,66^{ab}$ | $0,36 \pm 0,06^a$ |
|                  | FN        | $0,03 \pm 0,01^a$    | $0,71 \pm 0,19^a$    | $9,23 \pm 1,59^b$    | $0,52 \pm 0,11^a$ |
|                  | FH        | $0,02 \pm 0,01^a$    | $0,72 \pm 0,26^a$    | $7,66 \pm 0,97^{ab}$ | $0,42 \pm 0,17^a$ |
|                  | GN        | $0,03 \pm 0,08^a$    | $0,75 \pm 0,13^a$    | $8,50 \pm 1,24^{ab}$ | $0,38 \pm 2,43^a$ |
|                  | GH        | $0,01 \pm 0,01^a$    | $0,75 \pm 0,08^a$    | $8,11 \pm 0,63^{ab}$ | $0,39 \pm 0,02^a$ |
|                  | KAS 30    | $0,02 \pm 0,01^a$    | $1,04 \pm 0,39^a$    | $7,95 \pm 0,50^{ab}$ | $0,39 \pm 0,07^a$ |
|                  | KAS 60    | $0,03 \pm 0,01^a$    | $0,83 \pm 0,18^a$    | $9,36 \pm 1,53^b$    | $0,40 \pm 0,03^a$ |
| Mais             | AN        | $0,00 \pm 0,00^a$    | $4,33 \pm 0,85^{ab}$ | $4,85 \pm 1,16^a$    | $0,11 \pm 0,07^a$ |
|                  | AH        | $0,00 \pm 0,00^a$    | $4,47 \pm 0,83^{ab}$ | $5,17 \pm 1,01^a$    | $0,20 \pm 0,04^a$ |
|                  | PN        | $0,00 \pm 0,00^a$    | $4,52 \pm 0,81^{ab}$ | $5,18 \pm 3,17^a$    | $0,13 \pm 0,04^a$ |
|                  | PH        | $0,00 \pm 0,00^a$    | $5,14 \pm 1,11^{ab}$ | $3,32 \pm 0,69^a$    | $0,19 \pm 0,06^a$ |
|                  | FN        | $0,00 \pm 0,00^a$    | $4,48 \pm 0,40^{ab}$ | $5,52 \pm 2,64^a$    | $0,22 \pm 0,03^a$ |
|                  | FH        | $0,00 \pm 0,00^a$    | $5,17 \pm 0,50^{ab}$ | $3,15 \pm 0,42^a$    | $0,16 \pm 0,05^a$ |
|                  | GN        | $0,00 \pm 0,00^a$    | $4,93 \pm 1,68^{ab}$ | $2,98 \pm 0,47^a$    | $0,18 \pm 0,07^a$ |
|                  | GH        | $0,00 \pm 0,00^a$    | $5,29 \pm 0,83^{ab}$ | $4,60 \pm 1,22^a$    | $0,16 \pm 0,09^a$ |
|                  | KAS 30    | $0,00 \pm 0,00^a$    | $6,17 \pm 0,07^b$    | $5,35 \pm 1,44^a$    | $0,17 \pm 0,03^a$ |
|                  | KAS 60    | $0,00 \pm 0,00^a$    | $5,19 \pm 0,72^{ab}$ | $5,22 \pm 0,66^a$    | $0,17 \pm 0,05^a$ |
| Weizen Korn      | AN        | $0,00 \pm 0,00^a$    | $0,32 \pm 0,12^a$    | $4,20 \pm 0,99^a$    | $0,00 \pm 0,00^a$ |
|                  | AH        | $0,00 \pm 0,00^a$    | $0,33 \pm 0,01^a$    | $3,95 \pm 0,75^a$    | $0,00 \pm 0,00^a$ |
|                  | PN        | $0,00 \pm 0,00^a$    | $0,27 \pm 0,11^a$    | $3,72 \pm 0,52^a$    | $0,00 \pm 0,00^a$ |
|                  | PH        | $0,00 \pm 0,00^a$    | $0,34 \pm 0,13^a$    | $3,44 \pm 0,44^a$    | $0,00 \pm 0,00^a$ |
|                  | FN        | $0,00 \pm 0,00^a$    | $0,27 \pm 0,05^a$    | $4,31 \pm 1,07^a$    | $0,00 \pm 0,00^a$ |
|                  | FH        | $0,00 \pm 0,00^a$    | $0,47 \pm 0,46^a$    | $6,04 \pm 4,07^a$    | $0,00 \pm 0,00^a$ |
|                  | GN        | $0,00 \pm 0,00^a$    | $0,22 \pm 0,21^a$    | $4,02 \pm 1,52^a$    | $0,00 \pm 0,00^a$ |
|                  | GH        | $0,00 \pm 0,00^a$    | $0,12 \pm 0,07^a$    | $5,66 \pm 1,45^a$    | $0,00 \pm 0,00^a$ |
|                  | KAS 30    | $0,00 \pm 0,00^a$    | $0,46 \pm 0,36^a$    | $4,37 \pm 0,51^a$    | $0,00 \pm 0,00^a$ |
|                  | KAS 60    | $0,00 \pm 0,00^a$    | $0,24 \pm 0,22^a$    | $4,27 \pm 0,35^a$    | $0,00 \pm 0,00^a$ |
| Weizen Stroh     | AN        | $0,00 \pm 0,00^a$    | $10,20 \pm 1,83^a$   | $1,39 \pm 0,85^a$    | $0,00 \pm 0,00^a$ |
|                  | AH        | $0,00 \pm 0,00^a$    | $10,07 \pm 3,18^a$   | $1,73 \pm 0,95^a$    | $0,00 \pm 0,00^a$ |
|                  | PN        | $0,00 \pm 0,00^a$    | $10,71 \pm 1,26^a$   | $2,28 \pm 0,69^a$    | $0,00 \pm 0,00^a$ |
|                  | PH        | $0,00 \pm 0,00^a$    | $10,91 \pm 0,89^a$   | $2,19 \pm 1,04^a$    | $0,00 \pm 0,00^a$ |
|                  | FN        | $0,00 \pm 0,00^a$    | $10,70 \pm 2,98^a$   | $3,48 \pm 2,18^a$    | $0,00 \pm 0,00^a$ |
|                  | FH        | $0,00 \pm 0,00^a$    | $9,27 \pm 0,42^a$    | $1,90 \pm 1,16^a$    | $0,00 \pm 0,00^a$ |
|                  | GN        | $0,00 \pm 0,00^a$    | $11,84 \pm 1,56^a$   | $1,23 \pm 0,70^a$    | $0,00 \pm 0,00^a$ |
|                  | GH        | $0,00 \pm 0,00^a$    | $11,47 \pm 1,69^a$   | $0,62 \pm 2,41^a$    | $0,00 \pm 0,00^a$ |
|                  | KAS 30    | $0,00 \pm 0,00^a$    | $9,08 \pm 1,53^a$    | $3,92 \pm 6,66^a$    | $0,00 \pm 0,00^a$ |
|                  | KAS 60    | $0,00 \pm 0,00^a$    | $8,72 \pm 0,46^a$    | $0,61 \pm 1,61^a$    | $0,00 \pm 0,00^a$ |
| Weizen Stroh     | KAS 120   | $0,00 \pm 0,00^a$    | $10,21 \pm 4,08^a$   | $1,30 \pm 0,54^a$    | $0,00 \pm 0,00^a$ |
|                  | Kontrolle | $0,00 \pm 0,00^a$    | $12,22 \pm 3,44^a$   | $2,98 \pm 3,51^a$    | $0,00 \pm 0,00^a$ |

Blei wird ebenfalls in den Zellwänden der Wurzeln oder auch in Mykorrhizapilzen festgelegt und nur sehr begrenzt in die oberirdische Biomasse aufgenommen (Schubert, 2011; Gigliotti *et al.*, 1996). Die geringe Aufnahme von Cadmium und Blei hat auch mit anderen Faktoren zu tun. So können andere Nährstoffe wie z.B. Kalzium als kompetitive Inhibitoren für die Cadmiumaufnahme fungieren. Es ist auch bekannt, dass eine pH-Erhöhung zwar einerseits die Cadmiumaufnahme durch die Pflanzen erhöht, andererseits die Pflanzenverfügbarkeit von Cadmium aber reduziert. Cadmium und Blei werden zudem als zweiwertige Kationen stark an organische Substanz gebunden, was ihre Verfügbarkeit deutlich absenkt (Schubert, 2011). Bioabfallkompost fungiert demnach einerseits als Quelle für Cadmium und Blei, reduziert andererseits aber deren Pflanzenverfügbarkeit durch Erhöhung des pH-Wertes und durch Bereitstellung großer Mengen organischer Substanz. Bartl *et al.* (2002) fanden dementsprechend in einem fünfjährigen Feldversuch mit schwermetallbelasteten kompostierten Bioabfällen die höchsten Cadmiumgehalte in den Getreidekörnern der unbehandelten Kontrolle und begründeten dies mit dem oben beschriebenen Ursachenkomplex. Im hier vorgestellten Feldversuch wurden wiederholt große Mengen organischer Substanz eingebracht und der pH-Wert nachweisbar erhöht, was die Cadmium- und Bleiverfügbarkeit immer weiter abgesenkt haben dürfte.

Die Chromgehalte von Roggen betrugen nur max.  $1,04 \mu\text{g g}^{-1}$ . Die Gehalte in Mais waren bis zu fünffach höher, die Gehalte in Weizen bis zu zwölffach. Blume *et al.* (2010) geben an, dass Chromgehalte von bis zu  $1 \mu\text{g g}^{-1}$  TM in Pflanzen als normal zu bewerten sind und dass bei darüber hinausgehenden Werten mit einer Beeinträchtigung des Pflanzenwachstums zu rechnen ist. Insbesondere die Gehalte in Weizen scheinen verglichen damit sehr hoch. Chromgehalte und Abweichungen von der Norm sind in dieser Größenordnung jedoch auch von anderen Autoren berichtet worden. Li *et al.* (2005) fanden in jungen Weizenpflanzen in Abhängigkeit von der Bodenkonzentration Gehalte von bis zu  $24 \mu\text{g g}^{-1}$  TM und das Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL, 2016) fand während einer Studie zur Sicherheit von Lebensmitteln in Reis Höchstgehalte von bis zu  $11,9 \mu\text{g g}^{-1}$  im Korn, obwohl der entsprechende Mittelwert aller Proben nur bei  $0,379 \mu\text{g g}^{-1}$  lag. Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten zeigten sich nur bei Mais, wobei dort die höchsten Gehalte in der Kontrolle und der KAS 30-Variante gemessen wurden, die keinerlei Gärprodukte erhalten hatten. Chrom liegt in Abhängigkeit von den Redoxbedingungen in drei- und sechswertiger Form vor, wobei Cr (III) stark an Eisenoxide gebunden wird oder schwer lösliche Hydroxide bildet, während Cr (VI) Oxianionenkomplexe wie  $\text{Cr(VI)O}_4^{2-}$  formt, Verbindungen mit Bariumsulfat eingeht oder an mineralische Komponenten im Boden mit freien Hydroxylgruppen adsorbiert wird (Blume *et al.*, 2010; Rai *et al.*, 1989). Diese Adsorption steigt mit sinkendem pH-Wert. Andererseits wird bei hohen Chromkonzentrationen und niedrigen pH-Werten Cr(VI) zu Cr(III) reduziert, das dann in Lösung gehen kann. Bei pH-Werten über 6 wird Cr(III) ähnlich wie Aluminium als Hydroxid ausgefällt und ist dann nicht mehr pflanzenverfügbar (Rai *et al.*, 1989; McGrath, 1982; Dauderer, 2006). Dies erklärt eventuell, warum bei Mais höhere Gehalte in den KAS- und Kontrollparzellen gefunden wurden, in denen die pH-Werte des Bodens niedriger waren als in den Gärproduktparzellen. Neben dem pH-Wert beeinflussen auch andere Faktoren die Verfügbarkeit von Chrom im Boden, wie z.B. das Vorhan-

densein von Eisen oder anderen Chelatoren (Daunderer, 2006). Da diese nicht untersucht wurden, können die Ursachen für die unterschiedlichen Gehalte in Mais bzw. für die hohen Gehalte in Weizen nicht restlos aufgeklärt werden. Es wurden jedoch kaum Unterschiede zwischen den Varianten gemessen, weshalb davon auszugehen ist, dass die Gärprodukte nicht für die potenziell problematischen Chromgehalte in den Pflanzen verantwortlich sind.

Kupfer gehört zu den Schwermetallen und kann in bestimmten Verbindungen und Dosierungen toxisch wirken. Gleichzeitig ist es aber ein wichtiger Mikronährstoff, der üblicherweise in allen Pflanzenteilen gefunden wird (Gigliotti *et al.*, 1996). Durch Düngung werden jährlich bis zu 500 g ha<sup>-1</sup> ausgebracht (Kratz *et al.*, 2009). Obwohl in der hohen Aufwandmenge durch die Gärprodukte pro Jahr etwa die doppelte Menge auf die Flächen gelangte, bewegten sich die Bodengehalte im Vergleich zum deutschen Durchschnitt auch zu Versuchsende eher im unteren Bereich. Mittlere Kupfergehalte im Boden liegen in Deutschland zwischen 8 und 42 µg g<sup>-1</sup> (Kratz *et al.*, 2009). Im Versuch wurden maximal 14 µg g<sup>-1</sup> erreicht. Die Kupfergehalte im Pflanzenmaterial waren bei Roggen mit über 6 µg g<sup>-1</sup> in allen Varianten höher als bei Mais und Weizen. Die Gehalte stiegen mit zunehmender Stickstoffverfügbarkeit und waren in den KAS 60- und KAS 120- sowie in den kombinierten Mineraldünger-Gärprodukt-Varianten höher als in der Kontrolle und den Parzellen mit ausschließlicher Gärproduktanwendung. Dieser Zusammenhang wurde bei Mais und Weizen nicht festgestellt. Bei allen drei Kulturen wurden jedoch unabhängig von der Düngevariante die in der Literatur jeweils empfohlenen Gehalte an Kupfer erreicht, nicht aber überschritten (Kratz *et al.*, 2009; Ortseifen und Lammel, 2005). Die Versorgung mit pflanzenverfügbarem Kupfer war also ausreichend, ohne dass toxische Effekte zu erwarten wären.

Aufgrund der geringen Gehalte im oberirdischen Pflanzenmaterial waren die Gesamtentzüge durch das Erntegut gering.

Wie in Tabelle 55 dargestellt, wurden nur bei Chrom und Kupfer überhaupt nennenswerte Anteile der ausgebrachten Menge durch die Pflanzen wieder aufgenommen. Von Cadmium und Blei wurden weniger als ein Prozent der ausgebrachten Menge durch die Pflanzen wieder entzogen. In die Bilanzrechnung konnte Senf nicht aufgenommen werden, weil das Erntegut nicht auf Schwermetallgehalte untersucht wurde. Da mit der ersten Lieferung an Gärprodukten aber nur geringe Mengen an Schwermetalle ausgebracht wurden (weshalb keine Untersuchung des Pflanzenmaterials stattfand), dürfte dies das Ergebnis kaum wesentlich verändern.

Tabelle 55: Kummulierter Schwermetallentzug (prozentualer Anteil der ausgebrachten Menge) durch Roggen, Mais und Weizen im Feldversuch.

| Variante | Cadmium                                  | Chrom | Kupfer | Blei |
|----------|--|-------|--------|------|
|          | Entzug (Prozent der ausgebrachten Menge) |       |        |      |
| AN       | 0,81                                     | 15,59 | 15,73  | 0,13 |
| AH       | 0,10                                     | 7,32  | 5,87   | 0,06 |
| PN       | 0,71                                     | 9,31  | 9,39   | 0,12 |
| PH       | 0,09                                     | 5,23  | 2,98   | 0,08 |
| FN       | 0,87                                     | 15,78 | 20,82  | 0,40 |
| FH       | 0,14                                     | 8,06  | 6,33   | 0,11 |
| GN       | 0,85                                     | 10,40 | 13,58  | 0,28 |
| GH       | 0,11                                     | 5,52  | 6,93   | 0,10 |

### 3.6.4 Schlussfolgerungen

Zusammenfassend lassen sich aus dem Feldversuch folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Die Stickstoffverfügbarkeit ist in kompostierten Gärresten aus Bioabfällen in den ersten Jahren nach der Anwendung sehr gering. Nur ein Viertel bis ein Drittel des ausgebrachten Stickstoffs konnte in den drei Versuchsjahren durch die angebauten Kulturen aufgenommen werden. Trotz hoher Stickstoffgaben von über  $400 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  konnte im hier vorgestellten Feldversuch ein Düngeeffekt im Sinne einer Ertragssteigerung gegenüber der ungedüngten Kontrolle erst im dritten Versuchsjahr nachgewiesen werden. Dieser Effekt war nur bei der Feinfraktion, nicht aber bei den agglomerierten oder pelletierten Gärprodukten zu beobachten. Diese Aufbereitungswege setzen die Verfügbarkeit eventuell weiter herab bzw. verzögern die Mineralisation. Auch bei der Feinfraktion war die Stickstoffversorgung der Pflanzen so schlecht, dass der Proteingehalt von Weizen unter neun Prozent betrug und damit weit hinter den Qualitätsanforderungen zurück blieb.
- Tendenziell waren bei Senf und Roggen Synergieeffekte zu beobachten, wenn Gärprodukte und mineralische Stickstoffdüngung kombiniert wurden. Eventuell ist es möglich, Teile der mineralischen N-Düngung durch Gärprodukte zu ersetzen und trotzdem gleiche oder höhere Erträge zu erzielen.
- Positiv zu bewerten sind die hohen Gehalte an Phosphor und Kalium in den Gärprodukten, die sich zum Teil in höheren Gehalten an diesen Nährstoffen im Boden bzw. Pflanzenmaterial widerspiegeln. Hier besteht bei Anwendung von Gärprodukten dieser Art Einsparungspotential für andere Düngemittel. Die Aufbereitungsform scheint die Bereitstellung dieser beiden Nährelemente nicht in eindeutiger Weise zu beeinflussen.
- Die Anwendung der Gärprodukte führte zu einem Anstieg der pH-Werte im Boden auf über sechs, was sich insbesondere auf sandigen Standorten mit niedrigen pH-Werten als vorteilhaft erweisen kann. Die P-Verfügbarkeit wird in diesem pH-Bereich erhöht, während die Verfügbarkeit von Schwermetallen sinkt.
- Die Anwendung von kompostierten Gärprodukten birgt das Potential, die Kohlenstoffgehalte im Boden deutlich anzuheben. Dadurch kann bei regelmäßiger Anwendung nicht nur Kohlenstoff sequestriert, sondern durch Erhöhung des Humusgehaltes auch ein Beitrag zum Erhalt bzw. zur Förderung der Bodenfruchtbarkeit geleistet werden.
- Ein Anstieg der Schwermetallgehalte im Boden konnte trotz Überschreitung der laut BioAbfV (2013) zulässigen Höchstmengen nicht nachgewiesen werden. Andererseits wurden von Cadmium und Blei weniger als 1 %, bei Chrom max. 15 % und bei Kupfer max. 21 % der ausgebrachten Menge durch das geerntete Pflanzenmaterial wieder abgefahren. Langfristig ist angesichts solcher Aufnahmeraten bei Nichteinhaltung der Grenzwerte mit einer Anreicherung von Schwermetallen im Boden zu rechnen, die durch Anbau akkumulierender Pflanzenarten auch in die Nahrungskette gelangen könnten.



#### 4. Gesamtbewertung

Zu Beginn der Arbeiten wurden mehrere Fragen formuliert, die im Folgenden beantwortet werden können.

1. *Gibt es aus pflanzenbaulicher Sicht eine Einsatzmöglichkeit der Gärrückstände als Düngestoff oder ist (eventuell erst ab einer bestimmten Einsatzmenge) mit negativen Auswirkungen für die Pflanzenentwicklung zu rechnen? Welche Auswirkungen haben diese Gärrückstände auf die Ertragsbildungsprozesse und auf die innere und äußere Qualität der Ernteprodukte?*

Sollen durch den Einsatz von kompostierten Gärprodukten andere Düngemittel ersetzt werden, so ist dabei zu beachten, dass der Gehalt an pflanzenverfügbarem Stickstoff gering ist. In den Gefäßversuchen wurden nur maximal 12 % des ausgebrachten Stickstoffs durch die Pflanzen wieder entzogen, im Feldversuch über mehrere Jahre hinweg nur ca. ein Viertel bis ein Drittel. Der Rest verbleibt zum größten Teil in Form von organischen Stickstoffverbindungen im Boden, die in den Folgejahren mineralisiert werden können, was ein jährliches Einsparungspotential für Mineraldünger birgt. Eine Steigerung der Erträge durch den Einsatz der Gärprodukte war im Gefäßversuch zwar nachweisbar, fiel aber sehr gering aus. Im Feldversuch waren Ertragseffekte erst im dritten Jahr, d.h. nach viermaliger Ausbringung, nachzuweisen. Die Erträge entsprachen dann der Variante, die 30 kg ha<sup>-1</sup> N in Form von KAS erhalten hatte. Qualitätsparameter wie Proteingehalt und Korngröße erreichten überwiegend nicht das vom Handel geforderte Niveau. Beobachtet wurden aber Synergieeffekte, wenn Gärprodukte und mineralische Düngung kombiniert wurden. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf zur Ursache der beobachteten Effekte, damit daraus Handlungsempfehlungen und Einsparungsmöglichkeiten für Mineraldünger abgeleitet werden können.

Nicht zu unterschätzen ist die Wirkung der basisch wirksamen Bestandteile in kompostierten Gärprodukten. Durch die vorliegenden Untersuchungen konnte ein deutlicher Anstieg der pH-Werte nach Anwendung der Gärprodukte nachgewiesen werden. Bei regelmäßigem Einsatz solcher Produkte kann die ergänzende Kalkung reduziert werden.

Neben Stickstoff sind in den Gärprodukten nicht unerhebliche Mengen an Phosphor und Kalium enthalten. Diese sind besser pflanzenverfügbar als Stickstoff. Insbesondere die Phosphorverfügbarkeit wird durch die pH-Wirkung der Gärprodukte zusätzlich erhöht. Die Gehalte an Phosphor und Kalium im Pflanzenmaterial blieben in den Versuchen trotzdem überwiegend unter den laut Literaturangaben für ein gesundes Pflanzenwachstum notwendigen Mindestgehalten.

Als problematisch zu bewerten sind die hohen Gehalte an Schwermetallen in Bioabfallprodukten. Bei den hier untersuchten Produkten wurden die Grenzwerte für die Ausbringung auf Ackerflächen in zwei von vier Chargen deutlich überschritten. Selbst bei Einhaltung der Grenzwerte besteht bei langjähriger wiederholter Anwendung die Gefahr der Schwermetallakkumulation im Boden. Dem muss vorgebeugt werden, in dem zum einen die Qualität des Bioabfalls besser überwacht wird, und in dem zum anderen eine ausreichende Kontrolle der Zufuhr und der Gehalte im

Boden erfolgt. Die z.T. hohen Schwermetallfrachten könnten in Abhängigkeit von der angebauten Pflanzenart auch zu hohen Schwermetallgehalten im Erntegut führen. Andererseits konnte gezeigt werden, dass die kompostierten Gärprodukte durch die Erhöhung des pH-Wertes im Boden und durch die Zufuhr an organischer Substanz die Pflanzenverfügbarkeit von Schwermetallen eher verringern.

Eine Phytotoxizität der Gärprodukte wurde nur in Einzelfällen festgestellt und war nicht dosisabhängig, sondern auf punktuelle Verunreinigungen zurückzuführen. In Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Ausgangsmaterials ist sie jedoch auch nicht auszuschließen. Obergrenzen für einzelne Schadstoffe scheinen in diesem Zusammenhang sinnvoller als allgemeine Höchstmengen für die Anwendung von Bioabfallprodukten. Dies würde jedoch einen erheblichen Aufwand an Einzeluntersuchung im Rahmen der Qualitätskontrolle erfordern, der aus praktischen und ökonomischen Gründen kaum realisierbar erscheint. Nicht auszuschließen ist abgesehen von toxisch wirkenden Bestandteilen auch, dass es durch grobe Bestandteile oder feste Konglomerate zu einer mechanischen Behinderung der Pflanzenentwicklung kommt. Grob strukturierte Gärprodukte müssen gegebenenfalls ausreichend tief eingearbeitet werden, um eine Störung des Pflanzenwachstums vor allem in den ersten Wochen nach der Aussaat zu verhindern.

## *2. Welchen Einfluss haben diese Gärrückstände auf die Bodenbiologie, insbesondere auf Regenwürmer?*

Durch die Bodenatmungsversuche konnte gezeigt werden, dass der Einsatz kompostierter Gärprodukte aus Bioabfällen die Aktivität der Mikroorganismen im Boden fördert. Dies deutet darauf hin, dass bei regelmäßiger Anwendung auch die Menge an Mikroorganismen im Boden erhöht werden kann, was sich wiederum positiv auf die Bodenstruktur, den Bodenwasserhaushalt und die Bereitstellung pflanzenverfügbarer Nährstoffe auswirken würde (Jørgensen, 2011).

Die Wirkung der Gärprodukte auf Regenwürmer konnte im Feldversuch aufgrund der ungünstigen Witterungsbedingungen zum Probenahmezeitpunkt nicht eindeutig bestimmt werden. Die Anzahl der gefundenen Kokons deutet darauf hin, dass sich die Applikation der Gärprodukte langfristig als vorteilhaft für Regenwürmer erweisen könnte. Durch die im Labor durchgeführten Vermeidungstests wurde vor allem festgestellt, dass die Attraktivität der Gärprodukte stark von der jeweiligen Regenwurmart und ihrem Ernährungsverhalten abhängt. Eine Einschränkung der Habitatfunktion im Sinne der ISO Norm (17512-1, 2008) wurde in keinem Fall nachgewiesen.

## *3. Welchen Beitrag können aufbereitete Gärrückstände für den Kohlenstoffhaushalt im Boden leisten und wie bzw. in welchem Umfang erfolgt der Abbau des enthaltenen Kohlenstoff im Boden?*

Aus Bioabfällen hergestellte Komposte und Gärprodukte können in erheblichem Maße zur Steigerung der Humusgehalte im Boden beitragen, wobei sie sowohl leicht mineralisierbaren Nährhumus, als auch stabilen Dauerhumus zur Verfügung stellen. Zudem besitzen sie das Potenzial, große Mengen an Kohlenstoff im Boden zu sequestrieren. In den Untersuchungen zur Bodenatmung wurden in den ersten 100 Tagen ca. 20 % des ausgebrachten Kohlenstoffs mineralisiert,

während die restlichen 80 % als stabilisierter Kohlenstoff im Boden verbleiben. Dies entspricht bei einer maximal erlaubten Menge von 30 t ha<sup>-1</sup> TM Bioabfall in drei Jahren 6 bis 6,5 t ha<sup>-1</sup> Kohlenstoff.

4. *Welche Rolle spielt die Aufbereitung der Gärrückstände durch Pelletierung oder Agglomeratbildung für den Pflanzenbau und die Bodenbiologie?*

Ist aufgrund einer Überversorgung in bestimmten Regionen oder aufgrund einer verschärften Düngemittel-Gesetzgebung ein Transport von Gärresten über weitere Strecken notwendig, so ist eine Aufbereitung mit dem Ziel der Entwässerung, Verdichtung und Stabilisierung notwendig. In den Gefäßversuchen haben sich die Agglomerate gegenüber den Pellets als vorteilhaftere Aufbereitungsform erwiesen, sofern ein Düngeprodukt das Ziel der Aufbereitung ist. Die Agglomerate lösten sich schneller auf und stellten höhere Mengen an Nährstoffen für das Pflanzenwachstum zur Verfügung. Sie wiesen außerdem in allen Chargen höhere Schüttdichten als die Pellets auf, was im Hinblick auf Transportkosten und Lagerkapazitäten ein deutlicher Vorteil ist. Die beschriebenen Unterschiede zwischen Agglomeraten und Pellets könnten allerdings geringer ausfallen, wenn Pellets mit geringerem Durchmesser hergestellt würden. Inwieweit dies mit stukturreichen Bioabfällen möglich ist, muss an anderer Stelle untersucht werden.

Agglomeratbildung und Pelletierung können die Mineralisierung der Gärprodukte verzögern. Dies kann organische Substanz stabilisieren und Auswaschungs- bzw. Emissionsverluste verringern. Andererseits werden dadurch die Pflanzenverfügbarkeit der enthaltenen Nährstoffe und damit die unmittelbare Düngewirkung der Produkte verringert.

5. *Kann durch Zugabe organischer oder mineralischer Zuschlagstoffe der Düngewert der Produkte gesteigert werden? Welche Auswirkung hat dies auf die pflanzenbauliche und ökologische Wirkung der Produkte?*

Getestet wurden zwei verschiedene Stickstoffquellen (KAS und Tiermehl) sowie Stroh und Tonminerale, die die Wasseraufnahme und damit die Mineralisierung der Produkte beschleunigen sollten. Die Zugabe stickstoffhaltiger Zuschlagstoffe wie KAS oder Tiermehl erhöht die unmittelbare Düngewirkung der Produkte erheblich. In Abhängigkeit vom Ammoniumgehalt muss die Aufwandmenge angepasst werden, da sonst phytotoxische Effekte auftreten können. Diese sind bei Zugabe von Mineraldüngern größer als bei organischen N-Verbindungen. Hohe Ammoniumgehalte führen auch dazu, dass die Gärprodukte von Regenwürmern stark gemieden werden. Produkte mit KAS führen dementsprechend zu einer starken Ablehnung durch Regenwürmer, während die Beimengung von Tiermehl bis zu einem bestimmten Grad toleriert wird. Die zusätzliche Beimengung von Stroh reduzierte die negative Wirkung der Gärprodukte auf Regenwürmer, während die Zugabe von Tonmineralen die Phytotoxizität der Produkte zum Teil verringerte.

Durch die veränderte Zusammensetzung der Produkte wird die Menge an Kohlenstoffverbindungen, die pro Einheit Stickstoff ausgebracht wird, deutlich reduziert. Dies verringert die Humusproduktionsleistung der Gärprodukte erheblich.

Es ist davon auszugehen, dass die Anzahl der Biogasanlagen, die Bioabfälle als Substrat nutzen, in den kommenden Jahren weiter ansteigen wird. Dadurch fallen größere Mengen an Gärresten an, die einer sinnvollen Verwertung zugeführt werden müssen. Grundsätzlich ist festzustellen, dass ein Einsatz derartiger kompostierter Gärprodukte aus Bioabfällen in der Landwirtschaft möglich ist, sofern Stör- und Schadstofffrachten niedrig bleiben und entsprechende Grenzwerte eingehalten werden können. Insbesondere die hohen Gehalte an Phosphor, Kalium und organischer Substanz sowie die basische Wirkung der Produkte können sich positiv auf Pflanzenwachstum und Bodenfruchtbarkeit auswirken. In Bezug auf die Stickstoffverfügbarkeit scheinen die Vorgaben zur Düngebedarfsermittlung, die die novellierte Fassung der Düngeverordnung vorsieht, realistisch zu sein. Demnach kann die pauschale Nachlieferung von Stickstoff aus organischen Düngemitteln im Folgejahr der Düngung (10 % vom Gesamtstickstoff) im Fall von Kompost auf 3 Jahre verteilt werden: Im ersten Jahr 4 % sowie im zweiten und dritten Folgejahr jeweils 3 % des Gesamtstickstoffs (Kehres und Luyten-Naujoks, 2017).

Das Erstellen einer Klimabilanz im Zusammenhang mit der Vergärung und Kompostierung von Bioabfällen war zwar nicht Teil dieser Arbeit und wäre in der Umsetzung auch problematisch, weil die Vergärung und Aufbereitung des Bioabfalls zum Teil in Pilotanlagen durchgeführt wurde, von denen nicht direkt auf die Verhältnisse im großtechnischen Maßstab geschlossen werden kann. Andere Quellen haben jedoch berechnet, dass der Einsatz von kompostierten Gärprodukten in Landwirtschaft und Gartenbau ein CO<sub>2</sub>-Einsparungspotenzial von bis zu 99 kg t<sup>-1</sup> Bioabfall (bei Einsatz neuester Technik mit reduzierter Emission bis zu 194 kg t<sup>-1</sup>) birgt. Dieses Potenzial setzt sich zusammen aus der durch die Vergärung gewonnenen Energie, sowie aus der Einsparung von synthetischen Mineraldüngern und Torf und der Bindung von Kohlenstoff im Boden (BMU, 2012). Somit ist die Verwertung von Bioabfällen durch Vergärung, Kompostierung und anschließende Rückführung auf Ackerflächen auch im Hinblick auf die Reduktion von klimawirksamen Emissionen positiv zu bewerten.

In der Gesamtbetrachtung sind kompostierte Gärprodukte aus Bioabfällen bei Einhaltung der Grenzwerte für Schwermetalle und sonstige Fremdstoffe als hochwertige Dünger und Bodenhilfsstoffe anzusehen. Die Aufbereitung durch Agglomeratbildung oder Pelletierung zur Steigerung der Transportwürdigkeit und Lagerstabilität ist möglich, ohne dass die wesentlichen positiven Eigenschaften davon beeinträchtigt würden.

Eine zusammenfassende Darstellung der wichtigsten Ergebnisse findet sich in Tabelle 56.

Tabelle 56: Bewertung der verschiedenen Gärprodukte hinsichtlich ihrer Produkteigenschaften und ihrer Einflüsse auf den Boden und die Pflanzenentwicklung. Bewertungsskala: „--“ = sehr gering bzw. deutlich negative Effekte, „-“ = gering bzw. eher negative Effekte, „0“ = mittel bzw. keine Effekte, „+“ = hoch bzw. eher positive Effekte, „++“ = sehr hoch bzw. deutlich positive Effekte, ( ) = in Ausnahmefällen beobachtet bzw. nicht gesichert

| Parameter  | Kategorie 1   |              |         |               | Kategorie 2  |                    |                      |               |                     |                       |
|--|---------------|--------------|---------|---------------|--------------|--------------------|----------------------|---------------|---------------------|-----------------------|
|  | Fein-fraktion | Agglo-merate | Pellets | Grob-fraktion | AggloGr + TM | AggloGr + TM + Ton | AggloGr + TM + Stroh | AggloGr + KAS | AggloGr + KAS + Ton | AggloGr + KAS + Stroh |
| <b>Produkteigenschaften</b>  |               |              |         |               |              |                    |                      |               |                     |                       |
| Schüttdichte   | 0             | ++           | +       | -             | ++           | ++                 | +                    | ++            | ++                  | +                     |
| N-Gehalt   | -             | -            | -       | -             | +            | +                  | +                    | +             | +                   | +                     |
| P- und K-Gehalt  | +             | +            | +       | +             | 0            | 0                  | 0                    | 0             | 0                   | 0                     |
| N-Verfügbarkeit  | -             | -            | --      | --            | +            | +                  | +                    | ++            | ++                  | ++                    |
| P- und K-Verfügbarkeit   | +             | +            | +       | +             | +            | +                  | +                    | +             | +                   | +                     |
| Schwermetallgehalt   | -/+           | -/+          | -/+     | -/+           | -            | -                  | -                    | -             | -                   | -                     |
| Störstoffgehalt  | +             | +            | +       | +             | 0            | 0                  | 0                    | 0             | 0                   | 0                     |
| <b>Auswirkungen auf den Boden</b>                                      |               |              |         |               |              |                    |                      |               |                     |                       |
| Gehalt an organischer Substanz   | ++            | +            | +       | ++            | 0            | 0                  | 0                    | 0             | 0                   | 0                     |
| pH-Wert  | +             | +            | +       | +             | +            | +                  | +                    | +             | +                   | +                     |
| N <sub>T</sub> , P <sub>DL</sub> , K <sub>DL</sub> -Gehalt             | +             | +            | +       | +             | -/0          | -/0                | -/0                  | -/0           | -/0                 | -/0                   |
| Attraktivität für Regenwürmer  | 0/+           | 0/+          | 0/+     | 0/+           | -/0          | -/0                | -/0                  | -/0           | -/0                 | -/0                   |
| Abundanz von Regenwürmern  | (+)           | (+)          | (+)     | (+)           | n.b.         | n.b.               | n.b.                 | n.b.          | n.b.                | n.b.                  |
| Mikroorganismenaktivität   | +             | +            | +       | +             | n.b.         | n.b.               | n.b.                 | n.b.          | n.b.                | n.b.                  |
| <b>Auswirkungen auf die Pflanzenentwicklung und die Ertragsbildung</b> |               |              |         |               |              |                    |                      |               |                     |                       |
| Keimung und Aufgang bei Aufwandmengen > 200 kg ha <sup>-1</sup> N      | 0 (-)         | 0 (-)        | 0 (-)   | 0 (-)         | -            | -                  | n.b.                 | --            | --                  | n.b.                  |
| Wurzelbiomasse   | (+)           | (+)          | (+)     | (+)           | n.b.         | n.b.               | n.b.                 | n.b.          | n.b.                | n.b.                  |
| Wurzelverzweigung  | (+)           | (+)          | (+)     | (+)           | n.b.         | n.b.               | n.b.                 | n.b.          | n.b.                | n.b.                  |
| Ertrag   | 0/+           | 0/+          | 0/+     | -             | ++           | ++                 | ++                   | ++            | ++                  | ++                    |
| Äußere Qualität des Ernteguts  | -             | -            | -       | -             | +            | +                  | +                    | +             | +                   | +                     |
| Innere Qualität des Ernteguts  | -             | -            | -       | -             | +            | +                  | +                    | +             | +                   | +                     |

## Literaturverzeichnis

- Abdullahi, Y. R., Akunna, J. C., White, N. A., Hallett, P. D. & Wheatley, R. E. (2008). Investigating the effects of anaerobic and aerobic post-treatment on quality and stability of organic fraction of municipal solid waste as soil amendment. *Bioresour Technol* 99: 8631–8636.
- Achiba, W. B., Gabteni, N., Lakhdar, A., Laing, G. D., Verloo, M., Jedidi, N. & Gallali, T. (2009). Effects of 5-year application of municipal solid waste compost on the distribution and mobility of heavy metals in a Tunisian calcareous soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 130(3-4): 156-163.
- Alvarenga, P., Palma, P., Goncalves, A. P., Fernandes, R. M., Cunha-Queda, A. C., Duarte, E. & Vallini, G. (2007). Evaluation of chemical and ecotoxicological characteristics of biodegradable organic residues for application to agricultural land. *Environ Int* 33(4): 505-513.
- Amt für Statistik Berlin-Brandenburg (2015). Silomaisernte 2015 in Brandenburg deutlich niedriger als im Vorjahr. *Pressemitteilung Nr. 287 vom 18. November 2015*. Potsdam.
- Arthurson, V. (2009). Closing the global energy and nutrient cycles through application of biogas residue to agricultural land – Potential benefits and drawback. *Energies* 2(2): 226.
- Atuah, L. & Hodson, M. E. (2011). A comparison of the relative toxicity of bone meal and other P sources used as remedial treatments to the earthworm *Eisenia fetida*. *Pedobiologia* 54: S181-S186.
- Bachmann, S., Uptmoor, R. & Eichler-Löbermann, B. (2016). Phosphorus distribution and availability in untreated and mechanically separated biogas digestates. *Scientia Agricola* 73: 9-17.
- Bardos, P. (2004). Composting of mechanically segregated fractions of municipal solid waste – a review. Falfield, Bristol: SITA Environmental Trust.
- Bartl, B., Hartl, W. & Horak, O. (2002). Long-term application of biowaste compost versus mineral fertilization: Effects on the nutrient and heavy metal contents of soil and plants. *Plant Nutrition and Soil Science* 165: 161-165.
- Bauer, B. (2011). Wie kalkzehrend sind die N-Dünger wirklich? *Top Agrar* 12: 61-63.
- Baumgärtel, G. (2015). Richtwerte für die Düngung in Niedersachsen. *Landwirtschaftskammer Niedersachsen*.
- BBodSchV (1999). Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), die zuletzt durch Artikel 102 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist.
- Beckmann, U., Grünbeck, A., Hänsel, M., Karalus, W., Kolbe, H., Schuster, M., Arp, B., Beese, G., Krelling, B., Pölit, B. & Auerbach, D. (2001). *Getreide im Ökologischen Landbau - Informationen für Praxis und Beratung*. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft.
- Beerbaum, S. (2003). Measuring agricultural soil organic carbon - The situation in Germany. Proceedings of an OECD Expert Meeting Ottawa, Canada. In *Soil Organic Carbon and Agriculture: Developing Indicators for Policy Analyses* (Ed Smith, C. A. S.).
- Bermejo Domínguez, G. (2012). Agro-ecological aspects when applying the remaining products from agricultural biogas processes as fertilizer in crop production. Dissertation. Humboldt-Universität zu Berlin.
- Beuters, P. (2014). Dynamik des spezifisch gebundenen Ammoniums unter Einfluss der Fruchtfolge und der Wurzelarchitektur landwirtschaftlicher Nutzpflanzen. Dissertation. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn.
- BioAbfV (2013). Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung - BioAbfV) vom 21.09.1998, zuletzt geändert durch Artikel 5 der Verordnung vom 5. Dezember 2013 (BGBl. I S. 4043).
- Bittsánszky, A., Pilinszky, K., Gyulai, G. & Komives, T. (2015). Overcoming ammonium toxicity. *Plant Science* 231: 184-190.
- Blume, H.-P., Brümmer, G. W., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretzschmar, R., Stahr, K. & Wilke, B.-M. (2010). *Scheffer/Schachtschabel - Lehrbuch der Bodenkunde*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- BMELV (2012). Das Erneuerbare-Energien-Gesetz: Daten und Fakten zur Biomasse – Die Novelle 2012. Berlin: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV).

- BMU (2012). Ökologisch sinnvolle Verwertung von Bioabfällen - Anregungen für kommunale Entscheidungsträger. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- Böhm, H. (2007). Mineralstoffgehalte in Körnerleguminosen und Sommergetreide. In 9. *Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau* Hohenheim.
- Böhnel, H. & Lube, K. (2000). Clostridium botulinum and bio-compost. A contribution to the analysis of potential health hazards caused by bio-waste recycling. *Journal of Veterinary Medicine, Series B* 47: 785–795.
- Booth, L., Heppelthwaite, V. & O'Halloran, K. (2005). Effects-based assays in the earthworm *Aporrectodea caliginosa*: Their utilisation for evaluation of contaminated sites before and after remediation (8 pp). *Journal of Soils and Sediments* 5(2): 87-94.
- Booth, L. H. & O'Halloran, K. (2001). A comparison of biomarker responses in the earthworm *Aporrectodea caliginosa* to the organophosphorus insecticides diazinon and chlorpyrifos. *Environmental Toxicology and Chemistry* 20(11): 2494-2502.
- Botterbrodt, S., Lindhauer, M.-G., Rabe, E. & Seibel, W. (1999). Bestimmung des Proteingehaltes mittels DUMAS-Verbrennungsmethode. 150. Merkblatt der Arbeitsgemeinschaft Getreideforschung e.V., Detmold.
- Boström, U. & Lofs-Holmin, A. (1986). Growth of earthworms (*Alolobophora caliginosa*) fed shoots and roots of barley, meadow fescue and lucerne. Studies in relation to particle size, protein, crude fiber content and toxicity. *Pedobiologia* 29(1): 1-12.
- Bouwman, H. & Reinecke, A. J. (1991). A defined medium for the study of growth and reproduction of the earthworm *Eisenia fetida* (Oligochaeta). *Biology and Fertility of Soils* 10: 285-289.
- Bremner, J. M. (1990). Problems in the use of urea as a nitrogen fertilizer. *Soil Use and Management* 6(2): 70-71.
- Bück, A. & Tsotsas, E. (2016). Agglomeration. In *Encyclopedia of Food and Health*, 73-81 Oxford: Academic Press.
- Bundessortenamt (2016). Beschreibende Sortenliste. Getreide, Mais, Öl- und Faserpflanzen, Leguminosen, Rüben, Zwischenfrüchte.
- BVL (2016). *Berichte zur Lebensmittelsicherheit 2014 - Monitoring. Gemeinsamer Bericht des Bundes und der Länder*. Berlin: Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL).
- Cao, X., Chen, C., Zhang, D., Shu, B., Xiao, J. & Xia, R. (2013). Influence of nutrient deficiency on root architecture and root hair morphology of trifoliate orange (*Poncirus trifoliata* L. Raf.) seedlings under sand culture. *Scientia Horticulturae* 162: 100-105.
- Carpenter-Boggs, L., Kennedy, A. C. & Reganold, J. P. (2000). Organic and biodynamic management: effects on soil biology. *Soil Science Society of America Journal* 64: 1651–1659.
- Chapman, S. B. (1971). A simple conductimetric soil respirometer for field use. *OIKOS* 22: 348-353.
- Chen, R., Blagodatskaya, E., Senbayram, M., Blagodatsky, S., Myachina, O., Dittert, K. & Kuzyakov, Y. (2012). Decomposition of biogas residues in soil and their effects on microbial growth kinetics and enzyme activities. *Biomass and Bioenergy* 45: 221-229.
- Cheng, J. & Wong, M. (2002). Effects of earthworms on Zn fractionation in soils. *Biology and Fertility of Soils* 36(1): 72-78.
- Chiyoka, W. L., Zvomuya, F. & Hao, X. (2014). A bioassay of nitrogen availability in soils amended with solid digestate from anaerobically digested beef cattle feedlot manure. *Soil Science Society of America Journal* 78(4).
- Chojnacka, K., Chojnacki, A., Gorecka, H. & Gorecki, H. (2005). Bioavailability of heavy metals from polluted soils to plants. *Sci Total Environ* 337(1-3): 175-182.
- Chu, L. M. & Wong, M. H. (1987). Heavy metal contents of vegetable crops treated with refuse compost and sewage sludge. *Plant and Soil* 103: 191-197.
- Ciecko, Z., Wyszowski, M., Krajewski, W. & Zabielska, J. (2001). Effect of organic matter and liming on the reduction of cadmium uptake from soil by triticale and spring oilseed rape. *The Science of the Total Environment* 281: 37-45.
- Coucoulas, L. (2003). Agglomeration. In *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition (Second Edition)*, 73-80 Oxford: Academic Press.
- Curry, J. P. (1976). Some effects of animal manures on earthworms in grassland. *Pedobiologia* 16: 425-438.
- Curry, J. P., Doherty, P., Purvis, G. & Schmidt, O. (2008). Relationships between earthworm populations and management intensity in cattle-grazed pastures in Ireland. *Applied Soil Ecology* 39(1): 58-64.

- Daunderer, M. (2006). Handbuch der Umweltgifte. In *Klinische Umwelttoxikologie für die Praxis*, Vol. 6, Landsberg/Lech: ecomed.
- De Silva, P. M. C. S. & van Gestel, C. A. M. (2009). Comparative sensitivity of *Eisenia andrei* and *Perionyx excavatus* in earthworm avoidance tests using two soil types in the tropics. *Chemosphere* 77(11): 1609-1613.
- Déportes, I., Benoit-Guyed, J.-L. & Zmiroub, D. (1995). Hazard to man and the environment posed by the use of urban waste compost: A review. *The Science of the Total Environment* 172: 197-222.
- Desalegn, G., Binner, E., Smidt, E. & Lechner, P. (2005). Horse manure and biowaste composts as growing media component affects plant growth. In *African Crop Science Conference*, Vol. 7, 1139-1142 Uganda.
- Diaz-Lopez, G. & Mancha, R. (1994). Usefulness of Testing with *Eisenia fetida* for the Evaluation of Agrochemicals in Soils. In *Ecotoxicology of Soil Organisms*, 251-256 (Eds Donker, M. H., Eijssackers, H. & Heimbach, F.). CRC Press, Inc.
- Dieckmann, C., Edelmann, W., Kaltschmitt, M., Liebetrau, J., Oldenburg, S., Ritzkowski, M., Scholwin, F., Sträuber, H. & Weinrich, S. (2016). Biogaserzeugung und -nutzung. In *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren*, 1609-1755 (Eds Kaltschmitt, M., Hartmann, H. & Hofbauer, H.). Berlin/Heidelberg: Springer Vieweg.
- Diepenbrock, W., Ellmer, F. & Léon, J. (2016). *Ackerbau, Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung*. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer.
- Dittbrenner, N., Triebkorn, R., Moser, I. & Capowiez, Y. (2010). Physiological and behavioural effects of imidacloprid on two ecologically relevant earthworm species (*Lumbricus terrestris* and *Aporrectodea caliginosa*). *Ecotoxicology* 19(8): 1567-1573.
- Döring, S. (2011). *Pellets als Energieträger - Technologie und Anwendung*. Heidelberg: Springer.
- Edwards, C. A. & Bohlen, P. J. (1996). *Biology and Ecology of Earthworms*. London: Chapman and Hall.
- Edwards, C. A. & Lofty, J. R. (1982). Nitrogenous fertilizers and earthworm populations in agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry* 14: 515-521.
- Eisenträger, A., Maxam, G., Rila, J.-P. & Dott, W. (1998). Respiratorische Aktivitäten der Bodenmikroflora als ein Kriterium für Bodenqualität - Stufenkonzept zur Bewertung von hoch mit organischen Verbindungen belasteten Böden. In *Bodenökologie & Bodengenesse 26; Tagungsband Mobilität und Wirkung von Schadstoffen in urbanen Böden*.
- Englisch, M., Hartmann, H. & Kaltschmitt, M. (2016). Mechanische Aufbereitung. In *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren*, 417-492 (Eds Kaltschmitt, M., Hartmann, H. & Hofbauer, H.). Berlin/Heidelberg: Springer Vieweg.
- EPEA (2004). Boden-, Ressourcen- und Klimaschutz durch Kompostierung in Deutschland. Factsheet der Environmental Protection Encouragement Agency (EPEA Internationale Umweltforschung GmbH).
- Erhart, E., Hartl, W. & Putz, B. (2008). Total soil heavy-metal concentrations and mobile fractions after 10 years of biowaste-compost fertilization. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 171(3): 378-383.
- Ernst, G., Henseler, I., Felten, D. & Emmerling, C. (2009). Decomposition and mineralization of energy crop residues governed by earthworms. *Soil Biology and Biochemistry* 41(7): 1548-1554.
- Ernst, G., Müller, A., Göhler, H. & Emmerling, C. (2008). C and N turnover of fermented residues from biogas plants in soil in the presence of three different earthworm species (*Lumbricus terrestris*, *Aporrectodea longa*, *Aporrectodea caliginosa*). *Soil Biology and Biochemistry* 40(6): 1413-1420.
- Ernst, W. H. O. (1996). Bioavailability of heavy metals and decontamination of soils by plants. *Applied Geochemistry* 11(163-167).
- Fechner, H. & Kehres, B. (2014). Der Einsatz von Kompost lohnt sich. *Humus und Kompost aktuell* 08-09/2014: 6-9.
- Feil, B. & Bänziger, M. (1999). Beziehungen zwischen dem Kornertrag und den Konzentrationen von Protein, Phosphor und Kalium in den Körnern von Sommerweizensorten. *Pflanzenbauwissenschaften* 3(1): 1-8.
- Forde, B. & Lorenzo, H. (2001). The nutritional control of root development. *Plant and Soil* 232(1/2): 51-68.
- Förtsch, G. & Meinholz, H. (2015). *Handbuch Betriebliche Kreislaufwirtschaft*. Wiesbaden: Springer Spektrum.



- Fourie, F., Reinecke, S. A. & Reinecke, A. J. (2007). The determination of earthworm species sensitivity differences to cadmium genotoxicity using the comet assay. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 67(3): 361-368.
- Fricke, K., Goedecke, H. & Einzmann, U. (2003). Die Getrenntsammlung und Verwertung von Bioabfällen - Bestandsaufnahme 2003. In *Die Zukunft der Getrenntsammlung von Bioabfällen. Schriftenreihe des ANS* 44, 11-64 (Ed Römer, T.). Weimar: Orbit.
- Fricke, K., Heußner, C., Hüttner, A. & Turk, T. (2015). Vergärung von Bio- und Grünabfällen sowie Restabfällen. In *Anaerobtechnik*, 645-740 (Eds Rosenwinkel, K.-H., Kroiss, H., Dichtl, N., Seyfried, C.-F. & Weiland, P.). Berlin/Heidelberg: Springer Vieweg.
- Friege, H., Dornack, C. & Friege, N. (2015). Biogas als Treiber des Bioabfallmarkts. In *Marketing Erneuerbarer Energien - Grundlagen, Geschäftsmodelle, Fallbeispiele*, 317-334 (Eds Herbes, C. & Friege, C.). Wiesbaden: Springer Gabler.
- Fritsch, F. (2012). Nährstoffgehalte in Düngemitteln und im Erntegut für die Düngplanung und für Nährstoffvergleiche. *Staatliche Pflanzenbauberatung Rheinland-Pfalz*.
- Fründ, H.-C., Butt, K., Capowiez, Y., Eisenhauer, N., Emmerling, C., Ernst, G., Potthoff, M., Schädler, M. & Schrader, S. (2010). Using earthworms as model organisms in the laboratory: Recommendations for experimental implementations. *Pedobiologia* 53(2): 119-125.
- Fuchs, J., Kupper, T., Tamm, L. & Schenk, K. H. (2008). Compost and digestate: sustainability, benefits, impacts for the environment and for plant production. In *CODIS* (Eds Fuchs, J., Kupper, T., Tamm, L. & Schenk, K.). Solothurn, Schweiz.
- Gallert, C., Winter, J. & Svardal, K. (2015). Grundlagen anaerober Prozesse. In *Anaerobtechnik*, 19-80 (Eds Rosenwinkel, K.-H., Kroiss, H., Dichtl, N., Seyfried, C.-F. & Weiland, P.). Berlin/Heidelberg: Springer Vieweg.
- Gigliotti, G., Businelli, D. & Giusquiani, P. L. (1996). Trace metals uptake and distribution in corn plants grown on a 6-year urban waste compost amended soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 58: 199-206.
- Głąb, T. (2013). Effect of tractor traffic and N fertilization on the root morphology of grass/red clover mixture. *Soil and Tillage Research* 134: 163-171.
- Graefe, U., Elsner, D.-E., Gehrmann, J. & Stempelmann, I. (2002). Schwellenwerte der Bodenversauerung für die Bodenbiozönose. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* 98: 39-40.
- Gudleifsson, B. E. (2002). Impact of long term use of fertilizer on surface invertebrates in experimental plots in a permanent hayfield in Northern-Iceland. *BÚVÍSINDI Icelandic Agricultural Sciences* 15: 37-49.
- Hackett, C. (1968). A study of the root system of barley: I Effects of nutrition on two varieties. *New Phytologist* 67: 287-299.
- Hallett, P. D. (2008). A brief overview of the causes, impacts and amelioration of soil water repellency – a review. *Soil & Water Research* 3, Special Issue 1: S21-S29.
- Hallett, P. D., Gordon, D. C. & Bengough, A. G. (2003). Plant influence on rhizosphere hydraulic properties: direct measurements using a miniaturized infiltrometer. *New Phytologist* 157: 597-603.
- Hammac, W. A., Wood, C. W., Wood, B. H., Fasina, O. O., Feng, Y. & Shaw, J. N. (2007). Determination of bioavailable nitrogen and phosphorus from pelletized broiler litter. *Sci. Res. Essays* 2:89-94.
- Hansen, S. & Pommeresche, R. (2005). Cattle manure as food and poison for Earthworms - Effect of manure treatment in a long time field experiment. In *NJF-Seminar 372. Manure - an agronomic and environmental challenge*.
- Hauck, R. D. & Stephenson, H. F. (1965). Nitrification of Nitrogen Fertilizers. Effect of Nitrogen Source, Size and pH of the Granule, and Concentration. *J. Agr. Food Chem.* 13(6): 486-492.
- Hillebrecht, B., Brock, C. & Leithold, G. (2009). Saisonale Dynamik von C<sub>t</sub> und N<sub>t</sub> im Boden unter Winterweizen mit nachfolgender Zwischenfrucht. In *10. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau* (Eds Mayer, J., Alföldi, T., Leiber, F., Dubois, D., Fried, P., Heckendorn, F., Hillmann, E., Klocke, P., Lüscher, A., Riedel, S., Stolze, M., Strasser, F., van der Heijden, M. & Willer, H.). Zürich: Verlag Dr. Köster.
- Hou, J., Qian, Y., Liu, G. & Dong, R. (2005). The influence of temperature, pH and C/N Ratio on the growth and survival of earthworms in municipal solid waste. *Agricultural Engineering International: the CIGRE journal* VII.
- Huang, P. M. & Hardie, A. G. (2009). Formation mechanisms of humic substances in the environment. In *Biophysico-chemical processes involving natural nonliving organic*

- matter in environmental systems*, 41-109 (Eds Senesi, N., Xing, B. & Huang, P. M.). John Wiley & Sons, Inc.
- Huerta-Pujol, O., Gallart, M., Soliva, M., Martínez-Farré, F. X. & López, M. (2011). Effect of collection system on mineral content of biowaste. *Resources, Conservation and Recycling* 55(11): 1095-1099.
- Hund-Rinke, K. & Wiechering, H. (2001). Earthworm Avoidance Test for Soil Assessments - An Alternative for Acute and Reproduction Tests. *Journal of Soils and Sediments* 1: 15-20.
- Hupe, K. & Stegmann, R. (1998). Biologische Bioabfallverwertung: Kompostierung kontra Vergärung. Pro und Kontra aerobe und anaerobe Behandlung von Biomasse. In *Fachtagung "Quo vadis III – Die aktuellen Entwicklungen in der Abfallwirtschaft" am 5./6. Mai 1998* Lübeck.
- Illera, V., Walter, I., Souza, P. & Cala, V. (2000). Short-term effects of biosolid and municipal solid waste applications on heavy metals distribution in a degraded soil under a semi-arid environment. *The Science of the Total Environment* 255: 29-44.
- Irmeler, U. (2007). Raum- Zeit-Muster von Regenwurmpopulationen bei der Umstellung zum ökologischen Landbau (Spatial and temporal pattern of earthworm populations during the management change to organic farming). In *9. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau*. Hohenheim, Stuttgart.
- ISO 11269-2:2012, I. (2012). Soil quality – Determination of the effects of pollutants on soil flora – Part 2: Effects on chemicals on the emergence and growth of higher plants. *ISO (International Organization for Standardization), Geneva, Switzerland*.
- ISO 17512-1, I. (2008). ISO 17512-1 2008. Soil quality – avoidance test for determining the quality of soils and effects of chemicals on behaviour - Part 1: Test with earthworms (*Eisenia fetida* and *Eisenia andrei*). *ISO (International Organization for Standardization), Geneva, Switzerland*.
- Jarratt, N. & Thompson, H. (2009). Comparison between the sensitivity of enchytraeids and lumbricidae to chemicals, in particular plant production products. EFSA-Report CFT/EFSA/PPR/2008/01 Lot 3.
- Johnston, A. S. A., Sibly, R. M., Hodson, M. E., Alvarez, T., Thorbek, P. & McKenzie, A. (2015). Effects of agricultural management practices on earthworm populations and crop yield: validation and application of a mechanistic modelling approach. *Journal of Applied Ecology* 52(5): 1334-1342.
- Jørgensen, R. G. (2011). Funktionen und Quantifizierung der mikrobiellen Biomasse in Böden. In *Mikrobiologie von Böden - Biodiversität, Ökophysiologie und Metagenomik*, 29-54 (Ed Ottow, J. C. G.). Berlin/Heidelberg: Springer.
- Jung, M. C. (2008). Heavy metal concentrations in soils and factors affecting metal uptake by plants in the vicinity of a Korean Cu-mine. *Sensors* 8: 2413-2423.
- Kalbitz, K. & Knappe, S. (1997). Einfluß der Bodeneigenschaften auf die Freisetzung der gelösten organischen Substanz (DOM) aus dem Oberboden. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 160: 475-483.
- Kapanen, A. & Itävaara, M. (2001). Ecotoxicity tests for compost applications. *Ecotoxicol Environ Saf* 49(1): 1-16.
- Kehres, B. (2016a). Bioabfall ist die größte Wertstofffraktion. *Humus und Kompost aktuell* 7: 9.
- Kehres, B. (2016b). Positionpapier: Sortenreinheit von Bioabfällen gewährleisten. Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.
- Kehres, B. & Luyten-Naujoks, K. (2017). Entwurf der Novelle der Düngeverordnung veröffentlicht. *Nachrichten Humus und Kompost*.
- Kirsch, A. (2002). Einsatz kompostierter Gärreste in der Landwirtschaft. Dissertation. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn.
- Kirsch, A. (2010). Weitergehende Aufbereitung von Gärprodukten. *Humus und Kompost aktuell* 4: 6-7.
- KiyasudeenS, K., Ibrahim, M. H., Quaik, S. & Ismail, S. A. (2016). *Prospects of organic waste management and the significance of earthworms*. Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer.
- Klobucar, G. I., Stambuk, A., Srut, M., Husnjak, I., Merkas, M., Traven, L. & Cvetkovic, Z. (2011). *Aporrectodea caliginosa*, a suitable earthworm species for field based genotoxicity assessment? *Environ Pollut* 159(4): 841-849.
- Kluge, R., Deller, B., Flaig, H., Schulz, E., Reinhold, J. & Haber, N. (2008). Nachhaltige Kompostanwendung in der Landwirtschaft - Abschlussbericht Kompost-Anwendungsversuche Baden-Württemberg.
- Knoop, C. (2016). Stoffliche Charakterisierung aller Gärprodukte im Projekt VeNGA durch die BTU Cottbus, FG Geopedologie und Landschaftsentwicklung.

- Knoop, C., Dietrich, N., Heinrich, M., Krümmelbein, J., Dornack, C. & Raab, T. (2015). Aufbereitung von Bioabfall-Gärresten zur Nutzung als Bodenverbesserer. 10. *Biogastagung Dresden*.
- Körschens, M. (1997). Abhängigkeit der organischen Bodensubstanz (OBS) von Standort und Bewirtschaftung sowie ihr Einfluss auf Ertrag und Bodeneigenschaften. *Archives of Agronomy and Soil Science* 41(6): 435-463.
- Körschens, M. (2010). Der organische Kohlenstoff im Boden (Corg) – Bedeutung, Bestimmung, Bewertung (Soil organic carbon (Corg) – importance, determination, evaluation). *Archives of Agronomy and Soil Science* 56(4): 375-392.
- Körschens, M., Schulz, E., Klimanek, E.-M. & Franko, U. (1997). Die organische Bodensubstanz - Bedeutung, Definition, Bestimmung. *Archives of Agronomy and Soil Science* 41(6): 427-433.
- Kozicki, C. & Carlson, C. (2015). Pros and cons of non-pressure agglomeration pellets and extruded pellets - infomaterial from Feeco International. <http://feeco.com/pros-cons-non-pressure-agglomeration-pellets-extruded-pellets/>. 03.02.2016.
- Kranert, M. & Cord-Landwehr, K. (2010). *Einführung in die Abfallwirtschaft*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Krassowski, J., Lohmann, H., Salazar Gomez, I., Liebetrau, J., Fischer, E. & Strach, K. (2013). Bioabfallvergärung – Beiträge zur Prozessoptimierung und zur verbesserten Gasnutzung. Schlussbericht zum Projekt Optimierungsbeiträge Bioabfallvergärung. *Fraunhofer UMSICHT und DBFZ, Oberhausen, FKZ 03KB032A/B*.
- Kratz, S., Haneklaus, S. & Schnug, E. (2009). Kupfergehalte in Acker- und Grünlandböden und das Verhältnis dieser Gehalte zu den durch Pflanzenschutz ausgebrachten Kupfermengen. *Journal für Kulturpflanzen* 61(4): 112-116.
- Krieger, J., Fischer, N., Nielsen, K., Sensel-Gunke, K. & Ellmer, F. (2013). Einfluss verschiedener Gärprodukte aus Biogasanlagen auf die Kohlenstoffdynamik des Bodens. In 25. *Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften*, 140-141 Weihenstephan.
- Kröger, R., Reckermann, M., Schaper, C. & Theuvsen, L. (2016). Gärreste als Gartendünger vermarkten? *Berichte über Landwirtschaft - Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft* 94:1.
- Kroiss, H. & Svardal, K. (2015). Einflussfaktoren auf die anaeroben biologischen Abbauvorgänge. In *Anaerobtechnik*, 81-112 (Eds Rosenwinkel, K.-H., Kroiss, H., Dichtl, N., Seyfried, C.-F. & Weiland, P.). Berlin/Heidelberg: Springer Vieweg.
- Krück, S., Joschko, M., Schultz-Sternberg, R., Kroschewski, B. & Tessmann, J. (2006). A classification scheme for earthworm populations (Lumbricidae) in cultivated agricultural soils in Brandenburg, Germany. *Plant Nutrition and Soil Science* 169: 651–660.
- Kuhlmann, R. (2001). Einfluss der Kalkung auf den Boden. In *Calciumcarbonat. Von der Kreidezeit ins 21. Jahrhundert*, 280-286 (Ed Tegethoff, F. W.). Basel: Springer Basel AG.
- Kumar, P., Huang, C., Cai, J. & Miklavcic, S. J. (2014). Root phenotyping by root tip detection and classification through statistical learning. *Plant and Soil* 380(1-2): 193-209.
- Kumpiene, J., Bert, V., Dimitriou, I., Eriksson, J., Friesl-Hanl, W., Galazka, R., Herzig, R., Janssen, J., Kidd, P., Mench, M., Müller, I., Neu, S., Oustriere, N., Puschenreiter, M., Renella, G., Roumier, P.-H., Siebielec, G., Vangronsveld, J. & Manier, N. (2014). Selecting chemical and ecotoxicological test batteries for risk assessment of trace element-contaminated soils (phyto)managed by gentle remediation options (GRO). *Science of The Total Environment* 496: 510-522.
- Kuntze, H. (1994). Nährstoffauswaschung. In *Bodenkunde*, 206-209 (Eds Kuntze, H., Roeschmann, G. & Schwerdtfeger, G.). Stuttgart (Hohenheim): UTB Eugen Ulmer.
- Kupper, T. & Fuchs, J. (2007). Kompost und Gärgut in der Schweiz. Studie 1: Organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut. Studie 2: Auswirkungen von Kompost und Gärgut auf die Umwelt, die Bodenfruchtbarkeit sowie die Pflanzengesundheit. In *Umwelt-Wissen Nr. 0743*. Bern: Bundesamt für Umwelt.
- Lammert, B., Groschupp, C. & Weissbarth, J. (2004). Stickstoffverfügbarkeit von Komposten im Ökolandbau. In *Abschlussbericht zum Projekt ITADA 1.2.1 (1999-2001)*: Grenzüberschreitendes Institut zur rentablen umweltgerechten Landbewirtschaftung.
- Lange, H. (1985). Stickstoffdüngemittel. In *Agrarchemie. Lehrbuch für Agraringenieurschulen*, 198-203 Berlin: VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag.
- Lazcano, C., Arnold, J., Tato, A., Zaller, J. G. & Domínguez, J. (2009). Compost and vermicompost as nursery pot components: effects on tomato plant growth and morphology. *Spanish Journal of Agricultural Research* 7(4): 944-951.

- Lee, K. E. (1985). *Earthworms: their ecology and relationships with soils and land use*. Academic Press.
- Leroy, B. L. M., Schmidt, O., Van den Bossche, A., Reheul, D. & Moens, M. (2008). Earthworm population dynamics as influenced by the quality of exogenous organic matter. *Pedobiologia* 52(2): 139-150.
- Leroy, B. L. M., Van den Bossche, A., De Neve, S., Reheul, D. & Moens, M. (2007). The quality of exogenous organic matter: Short-term influence on earthworm abundance. *European Journal of Soil Biology* 43: S196-S200.
- LfL (2013a). Basisdaten für die Ermittlung des Düngebedarfs, für die Umsetzung der Düngeverordnung, zur Berechnung des KULAP-Nährstoff-Saldos und zur Berechnung der Nährstoffbilanz nach Hoftor-Ansatz. *Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)*.
- LfL (2013b). Was ist bei der landwirtschaftlichen Verwertung von Bioabfällen zu beachten? Merkblatt der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL).
- Li, G.-J., Zhang, C.-B., Zhan, J. & Wang, F. (2005). Chrome Sludge Compost - Effects on Crops and Soils. *Journal of the Society of Leather Technologists and Chemists* 90: 10-13.
- López-Bucio, J., Cruz-Ramírez, A. & Herrera-Estrella, L. (2003). The role of nutrient availability in regulating root architecture. *Current Opinion in Plant Biology* 6(3): 280-287.
- Lorenz, F. & Maidl, F.-X. (2005). Feldfruchtbau. In *Faustzahlen für die Landwirtschaft*, Vol. 13, 299-314 (Ed Kuratorium für Technik und Bauesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)). Darmstadt.
- Loureiro, S., Soares, A. M. V. M. & Nogueira, A. J. A. (2005). Terrestrial avoidance behaviour tests as screening tool to assess soil contamination. *Environ Pollut* 138(1): 121-131.
- LUBW (2006). Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg: Schwermetalle in Regenwürmern Baden-Württembergs.
- Lukkari, T., Aatsinki, M., Väisänen, A. & Haimi, J. (2005). Toxicity of copper and zinc assessed with three different earthworm tests. *Applied Soil Ecology* 30(2): 133-146.
- Ma, Z., Bielenberg, D. G., Brown, K. M. & Lynch, J. P. (2001). Regulation of root hair density by phosphorus availability in *Arabidopsis thaliana*. *Plant, Cell & Environment* 24(4): 459-467.
- Maleri, R. A., Reinecke, A. J. & Reinecke, S. A. (2008). Metal uptake of two ecophysiologically different earthworms (*Eisenia fetida* and *Aporrectodea caliginosa*) exposed to ultramafic soils. *Applied Soil Ecology* 38(1): 42-50.
- Marhan, S. & Scheu, S. (2005). The influence of mineral and organic fertilisers on the growth of the endogeic earthworm *Octolasion tytaeum* (Savigny). *Pedobiologia* 49(3): 239-249.
- McGrath, S. P. (1982). The uptake and translocation of tri- and hexa-valent Chromium and effects on the growth of oat in flowing nutrient solution and in soil. *New Phytologist* 92: 381-390.
- Meers, E., Samson, R., Tack, F. M. G., Ruttens, A., Vandegehuchte, M., Vangronsveld, J. & Verloo, M. G. (2007). Phytoavailability assessment of heavy metals in soils by single extractions and accumulation by *Phaseolus vulgaris*. *Environmental and Experimental Botany* 60(3): 385-396.
- Meier, U. (2001). Growth stages of mono- and dicotyledonous plants - BBCH Monograph.
- Mengel, K. (1996). Turnover of organic nitrogen in soils and its availability to crops. *Plant and Soil* 181: 83-93.
- Mengel, K. & Schmeer, H. (1985). Effect of straw, cellulose and lignin on the turnover and availability of labelled ammonium nitrate. *Biology and Fertility of Soils* 1: 175-181.
- Merbach, W., Wittenmayer, L. & Augustin, J. (1999). *Stoffumsatz im wurzelnahen Raum: 9. Borkheider Seminar zur Ökophysiologie des Wurzelraumes*. Leipzig.
- Möller-Arnold, E. & Feichtinger, E. (1929). Bestimmung des Düngebedürfnisses nach Mitscherlich: Arbeitsweise bei Gefäßversuchen. In *Der Feldversuch in der Praxis. Ableitung zur Durchführung von Feldversuchen für Versuchsleiter, Landwirte und Studierende*, 269-275 Wien: Julius Springer.
- Möller, K. & Müller, T. (2012). Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Engineering in Life Sciences* 12(3): 242-257.
- Monroy, F., Aira, M., Domínguez, J. & Velando, A. (2006). Seasonal population dynamics of *Eisenia fetida* (Savigny, 1826) (Oligochaeta, Lumbricidae) in the field. *Comptes Rendus Biologies* 329(11): 912-915.
- Morgan, J. E. & Morgan, A. J. (1999). The accumulation of metals (Cd, Cu, Pb, Zn and Ca) by two ecologically contrasting earthworm species (*Lumbricus rubellus* and *Aporrectodea caliginosa*): implications for ecotoxicological testing. *Applied Soil Ecology* 13(1): 9-20.
- Narwal, R. P., Singh, B. R. & Salbu, B. (1999). Association of cadmium, zinc, copper, and nickel with components in naturally heavy metal-rich soils studied by parallel and sequential extractions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 30(7-8): 1209-1230.

- Neilson, R. & Boag, B. (2003). Feeding preferences of some earthworm species common to upland pastures in Scotland. *Pedobiologia* 47(1): 1-8.
- O'Dell, R., Silk, W., Green, P. & Claassen, V. (2007). Compost amendment of Cu-Zn minespoil reduces toxic bioavailable heavy metal concentrations and promotes establishment and biomass production of *Bromus carinatus* (Hook and Arn.). *Environ Pollut* 148(1): 115-124.
- Ortseifen, U. & Lammel, J. (2005). Pflanzenernährung und Düngung. In *Faustzahlen für die Landwirtschaft*, Vol. 13, 208-281 (Ed Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)). Darmstadt.
- Ottow, J. C. G. (2011). *Mikrobiologie von Böden - Biodiversität, Ökophysiologie und Metagenomik*. Berlin/Heidelberg: Springer.
- Owojori, O. J. & Reinecke, A. J. (2009). Avoidance behaviour of two eco-physiologically different earthworms (*Eisenia fetida* and *Aporrectodea caliginosa*) in natural and artificial saline soils. *Chemosphere* 75(3): 279-283.
- Owojori, O. J., Reinecke, A. J., Voua-Otomo, P. & Reinecke, S. A. (2009). Comparative study of the effects of salinity on life-cycle parameters of four soil-dwelling species (*Folsomia candida*, *Enchytraeus doerjesi*, *Eisenia fetida* and *Aporrectodea caliginosa*). *Pedobiologia* 52(6): 351-360.
- Paulsen, H. M. & Schochow, M. (2007). Nährstoffgehalte und Nährstoffentzüge von Pflanzen in Mischfruchtanbausystemen mit Ölpflanzen im ökologischen Landbau. In *Anbau von Mischkulturen mit Ölpflanzen zur Verbesserung der Flächenproduktivität im ökologischen Landbau - Nährstoffaufnahme, Unkrautunterdrückung, Schaderregerbefall und Produktqualitäten. Abschlussbericht zum BÖL-Projekt Nr. 03OE113*, Trenthorst.
- Pérès, G., Vandenbulcke, F., Guernion, M., Hedde, M., Beguiristain, T., Douay, F., Houot, S., Piron, D., Richard, A., Bispo, A., Grand, C., Galsomies, L. & Cluzeau, D. (2011). Earthworm indicators as tools for soil monitoring, characterization and risk assessment. An example from the national Bioindicator programme (France). *Pedobiologia* 54: S77-S87.
- Perez, D. V., Alcantara, S., Ribeiro, C. C., Pereira, R. E., Fontes, G. C., Wasserman, M. A., Venezuela, T. C., Meneguelli, N. A., de Macedo, J. R. & Barradas, C. A. (2007). Composted municipal waste effects on chemical properties of a Brazilian soil. *Bioresour Technol* 98(3): 525-533.
- Petruzzelli, G., Lubrano, L. & Guidi, G. (1989). Uptake by corn and chemical extractability of heavy metals from a four year compost treated soil. *Plant and Soil* 116: 23-27.
- Powlson, D. S., Jenkinson, D. S., Pruden, G. & Johnston, A. E. (1985). The Effect of Straw Incorporation on the Uptake of Nitrogen by Winter Wheat. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 36: 26-30.
- Puschenreiter, M., Horak, O., Friesl, W. & Hartl, W. (2005). Low-cost agricultural measures to reduce heavy metal transfer into the food chain – a review. *Plant, Soil and Environment* 51(1): 1-11.
- Raab, G. (2014). Haupt- und Spurenelemente Teil 2: Das Nährelement Phosphor. *Öko-Obstbau* 2: 6-9.
- Raab, T. & Knoop, C. (2015). VeNGA-Zwischenbericht, Teilprojekt "Bereitstellung von Gärrückständen/Gärprodukten aus der Abfallvergärung als Bodenverbesserer". Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg: Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg.
- Rai, D., Eary, L. E. & Zachara, J. M. (1989). Environmental Chemistry of Chromium. *The Science of the Total Environment* 86: 15-23.
- Rauh, S. (2016). Entwicklungsperspektiven der Abfallvergärung. *Humus und Kompost aktuell* 8/9: 5-6.
- Raussen, T. & Kern, M. (2014). *Biogasatlas 2014 / 2015: Anlagenhandbuch der Vergärung biogener Abfälle in Deutschland und Europa*. Witzenhhausen: Witzenhhausen Institut.
- Reibe, K., Götz, K.-P., Döring, T. F., Roß, C.-L. & Ellmer, F. (2014). Impact of hydro-/biochars on root morphology of spring wheat. *Archives of Agronomy and Soil Science*: 1-14.
- Reisewitz, A. & Plötzky, J. (2007). Verarbeitungsqualität von Weizen für die Backwarenherstellung aus Sicht des Handels. In 23. *Getreide-Tagung* Detmold.
- Rivard, C. J., Rodriguez, J. B., Nagle, N. J., Self, J. R., Kay, B. D., Soltanpour, P. N. & Nieves, R. A. (1995). Anaerobic digestion of municipal solid waste. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 51(1): 125-135.
- Robertson, J. D. (1936). The function of the calciferous glands of earthworms. *Journal of Experimental Biology* 13: 279-297.
- Rolink, D. (2013). Gärreste vermarkten: Separieren reicht nicht. *Top Agrar* 7: 114-118.

- Ross, C.-L., Mundschenk, E., Wilken, V., Sensel-Gunke, K. & Ellmer, F. (2017a). Biowaste Digestates: Influence of Pelletization on Nutrient Release and Early Plant Development of Oats. *Waste and Biomass Valorization*.
- Ross, C.-L., Wilken, V., Krück, S., Nielsen, K., Sensel-Gunke, K. & Ellmer, F. (2017b). Assessing the Impact of Soil Amendments made of processed Biowaste Digestate on Soil Macrofauna using two different Earthworm Species. *Archives of Agronomy and Soil Science*.
- Roubířková, A. & Frouz, J. (2014). Performance of the earthworm *Aporrectodea caliginosa* on unreclaimed spoil heaps at different successional stages. *European Journal of Soil Biology* 65: 57-61.
- Saveyn, H. & Eder, P. (2014). End-of-waste criteria for biodegradable waste subjected to biological treatment (compost & digestate): Technical proposals. Luxembourg: European Commission.
- Schaefer, M. (2003). Behavioural endpoints in earthworm ecotoxicology. *Journal of Soils and Sediments* 3(2): 79-84.
- Scherer, H. W. & Mengel, K. (1983). Umsatz von <sup>15</sup>N markiertem Nitratstickstoff im Boden in Abhängigkeit von Strohdüngung und Bodenfeuchte. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 146: 109-117.
- Scherer, H. W., Welp, G. & Metker, D. J. (2008). Kompost fördert die biologische Aktivität und das Stickstoffnachlieferungsvermögen des Bodens. *Getreide Magazin* 1: 2-4.
- Schloz, D. & Pelz, S. (2012). Endbericht zum Forschungsprojekt "Biogene Gase - Unterer Lindenhof", Teilprojekt "Aufbereitung von Gärresten" im Rahmen der Bioenergieforschungsplattform Bdaen-Württemberg. Rottenburg: Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg.
- Schneeweiß, V. (2013). Anforderungen an Getreide und Getreidemahlprodukte zur Herstellung von Lebensmitteln. In *Getreidehandelstag 18./19. Juni 2013* Burg Warberg.
- Schneider, M. (2015). Strohverkauf und Kompostdüngung. *Humus und Kompost aktuell* 07/2015: 1-3.
- Schreiber, E., Degner, J., Farack, M., Götz, R., Rainer, P. & Zorn, W. (2009). *Leitlinie zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Sommerhafer*. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft.
- Schubert, S. (2011). *Pflanzenernährung - Grundwissen Bachelor*. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer KG.
- Schüch, A., Daniel-Gromke, J., Liebetrau, J. & Nelles, M. (2014). Stand und Perspektiven der Abfall- und Reststoffvergärung in Deutschland. *BIOGAS JOURNAL* 2/2014: 34-38.
- Schulz, E. (1997). Charakterisierung der organischen Bodensubstanz (OBS) nach dem Grad ihrer Umsetzbarkeit und ihre Bedeutung für Transformationsprozesse für Nähr- und Schadstoffe. *Archives of Agronomy and Soil Science* 41(6): 465-483.
- Scullion, J. & Ramshaw, G. A. (1987). Effects of various manurial treatments on earthworm activity in grassland. *Biological Agriculture & Horticulture: An International Journal for Sustainable Production Systems* 4(4): 271-281.
- Smith, S. R. (2009). A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste composts compared to sewage sludge. *Environ Int* 35(1): 142-156.
- Smolders, E. (2001). Cadmium uptake by plants. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health* 14(2): 177-183.
- Spurgeon, D. J. & Hopkin, S. P. (1996). Effects of Metal-Contaminated Soils on the Growth, Sexual Development, and Early Cocoon Production of the Earthworm *Eisenia fetida*, with Particular Reference to Zinc. *Ecotoxicol Environ Saf* 35: 86-95.
- Spurgeon, D. J., Svendsen, C., Hankard, P. K., Toal, M., McLennan, D., Wright, J., Walker, L., Ainsworth, G., Wienberg, C. & Fishwick, S. K. (2004). Application of sublethal ecotoxicological tests for measuring harm in terrestrial ecosystems. Vol. R&D Technical Report P5-063/TR2.
- Stenersen, J., Brekke, E. & Engelstad, F. (1992). Earthworms for toxicity testing; species differences in response towards cholinesterase inhibiting insecticides. *Soil Biology and Biochemistry* 24(12): 1761-1764.
- Strippel, F., Findeisen, C., Hofman, F., Wagner, L. & Wilken, D. (2016). Biowaste to Biogas. *Informationsbroschüre des Fachverbands Biogas e.V.*
- Sümer, R. (2012). Auswirkungen verschiedener Bodennutzungssysteme auf ausgewählte physiko-chemische Bodeneigenschaften und pflanzenbauliche Parameter in Berlin-Dahlem und Dedelow. Dissertation. Humboldt-Universität zu Berlin.

- Thrän, D., Arendt, O., Adwiraah, H. & Kaltschmitt, M. (2016). Nebenprodukte, Rückstände und Abfälle. In *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren*, 273-324 (Eds Kaltschmitt, M., Hartmann, H. & Hofbauer, H.). Berlin/Heidelberg: Springer Vieweg.
- Tietze, M. (2014). Herstellung von aufbereiteten Gärprodukten aus Bioabfällen - Beschreibung des Herstellungsprozesses durch die Firma GICON GmbH. Schriftliche Mitteilung.
- Tietze, M. (2015). Kompostierungsdauer der Gärprodukt-Lieferungen im Jahr 2015. Mündliche Mitteilung.
- Tillman, R., Scotter, D., Wallis, M. & Clothier, B. (1989). Water repellency and its measurement by using intrinsic sorptivity. *Soil Research* 27(4): 637-644.
- Tiquia, S. M. (2010). Reduction of compost phytotoxicity during the process of decomposition. *Chemosphere* 79(5): 506-512.
- Trinchera, A., Torrisi, B., Allegra, M., Rinaldi, S., Rea, E., Intrigliolo, F. & Roccuzzo, G. (2015). Effects of Organic Fertilization on Soil Organic Matter and Root Morphology and Density of Orange Trees. *Acta Horticulturae* (1065): 1807-1813.
- Trumbore, S. E. (1997). Potential responses of soil organic carbon to global environmental change. *The National Academy of Sciences* 94: 8284-8291.
- Tüffers, A. (2009). Nährstoffhaushalt. In *Botanik - Taschenlehrbuch Biologie* (Ed Munk, K.). Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Tuominen, J., Kylmä, J., Kapanen, A., Venelampi, O., Itävaara, M. & Seppälä, J. (2002). Biodegradation of lactic acid based polymers under controlled composting conditions and evaluation of the ecotoxicological impact. *Biomacromolecules* 3(445-455).
- Vanden Nest, T., Vandecasteele, B., Ruysschaert, G., Cougnon, M., Merckx, R. & Reheul, D. (2014). Effect of organic and mineral fertilizers on soil P and C levels, crop yield and P leaching in a long term trial on a silt loam soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 197: 309-317.
- Veeken, A. & Hamelers, B. (2002). Sources of Cd, Cu, Pb and Zn in biowaste. *The Science of the Total Environment* 300: 87-98.
- Wadhia, K. & Thompson, K. C. (2007). Low-cost ecotoxicity testing of environmental samples using microbiotests for potential implementation of the Water Framework Directive. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 26(4): 300-307.
- Walker, D. J., Clemente, R. & Bernal, M. P. (2004). Contrasting effects of manure and compost on soil pH, heavy metal availability and growth of *Chenopodium album* L. in a soil contaminated by pyritic mine waste. *Chemosphere* 57: 215-224.
- Walker, D. J., Clemente, R., Roig, A. & Bernal, M. P. (2003). The effects of soil amendments on heavy metal bioavailability in two contaminated Mediterranean soils. *Environmental Pollution* 122 122: 303-312.
- Wang, C., Liu, W., Li, Q., Ma, D., Lu, H., Feng, W., Xie, Y., Zhu, Y. & Guo, T. (2014). Effects of different irrigation and nitrogen regimes on root growth and its correlation with above-ground plant parts in high-yielding wheat under field conditions. *Field Crops Research* 165: 138-149.
- Wang, W. (1991). Ammonia toxicity to macrophytes (common duckweed and rice) using static and renewal methods. *Environmental Toxicology and Chemistry* 10(9): 1173-1177.
- Watson, C. J., Kilpatrick, D. J. & Cooper, J. E. (1995). The effect of increasing application rate of granular calcium ammonium nitrate on net nitrification in a laboratory study of grassland soils. *Fertilizer Research* 40: 155-161.
- Weber, J., Karczewska, A., Drozd, J., Licznar, M., Licznar, S., Jamroz, E. & Kocowicz, A. (2007). Agricultural and ecological aspects of a sandy soil as affected by the application of municipal solid waste composts. *Soil Biology and Biochemistry* 39(6): 1294-1302.
- Weiland, P. (2015). Landwirtschaftliche Vergärungsanlagen. In *Anaerobtechnik*, 605-635 (Eds Rosenwinkel, K.-H., Kroiss, H., Dichtl, N., Seyfried, C.-F. & Weiland, P.). Berlin/Heidelberg: Springer Vieweg.
- Wen, B., Hu, X.-y., Liu, Y., Wang, W.-s., Feng, M.-h. & Shan, X.-q. (2004). The role of earthworms (*Eisenia fetida*) in influencing bioavailability of heavy metals in soils. *Biology and Fertility of Soils* 40(3).
- Wetter, C. & Brüggling, E. (2006). Machbarkeitsstudie zur Verwertung von Gärresten aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Münster: FH Münster, University of Applied Science.
- Whalen, J. K., Chang, C., Clayton, G. W. & Carefoot, J. P. (2000). Cattle Manure Amendments Can Increase the pH of Acid Soils. *Soil Science Society of America Journal* 64(3): 962-966.
- Whalen, J. K., Parmelee, R. W. & Edwards, C. A. (1998). Population dynamics of earthworm communities in corn agroecosystems receiving organic or inorganic fertilizer amendments. *Biology and Fertility of Soils* 27: 400-407.

- Williamson, L. C., Ribrioux, S. P. C. P., Fitter, A. H. & Leyser, H. M. O. (2001). Phosphate availability regulates root system architecture in arabidopsis. *Plant Physiology* 126(2): 875-882.
- Wójcik, M. & Tukiendorf, A. (2005). Cadmium uptake, localization and detoxification in *Zea mays*. *BIOLOGIA PLANTARUM* 49(2): 237-245.
- Wong, M. H. (1985). Phytotoxicity of refuse compost during the process of maturation. *Environmental Pollution Series A, Ecological and Biological* 37(2): 159-174.
- Wragge, V. (2014). Gärprodukte aus Biogasanlagen im pflanzenbaulichen Stoffkreislauf. Dissertation. Humboldt-Universität zu Berlin.
- Xie, X., Qian, Y., Wu, Y., Yin, J. & Zhai, J. (2013). Effects of decabromodiphenyl ether (BDE-209) on the avoidance response, survival, growth and reproduction of earthworms (*Eisenia fetida*). *Ecotoxicol Environ Saf* 90: 21-27.
- Xue, Y.-F., Zhang, W., Liu, D.-Y., Yue, S.-C., Cui, Z.-L., Chen, X.-P. & Zou, C.-Q. (2014). Effects of nitrogen management on root morphology and zinc translocation from root to shoot of winter wheat in the field. *Field Crops Research* 161: 38-45.
- YARA (2016). Beschreibung des YARA-N-Testers (Messprinzip). <http://www.n-tester.de/files/messprinzip.html>. Seitenzugriff am 01.09.2016.
- Zaborski, E. R. (2003). Allyl isothiocyanate: an alternative chemical expellant for sampling earthworms. *Applied Soil Ecology* 22: 87-95.
- Zaller, J. G. & Köpke, U. (2004). Effects of traditional and biodynamic farmyard manure amendment on yields, soil chemical, biochemical and biological properties in a long-term field experiment. *Biology and Fertility of Soils* 40(4).
- Zhang, C., Su, H., Baeyens, J. & Tan, T. (2014). Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 38: 383-392.



## Anhang

### Abbildungsverzeichnis

- Abbildung A 1: Verteilung der Regenwürmer (*E. fetida*) im Vermeidungstest zu Gärprodukten der Kategorie 1 (Lieferung **Juni 2014**) auf Kontroll- und Substratseite im Testcontainer. Fehlerbalken stellen Standardabweichung dar. „200“ = Aufwandmenge entsprechend 200 kg ha<sup>-1</sup> N (blau-rote Balken); „400“ = Aufwandmenge 400 kg ha<sup>-1</sup> N (grün-gelbe Balken); Fein = Feinfraktion; Grob = Grobfraktion; Agglo = Agglomerate; SM = Stallmist. ....CXLV
- Abbildung A 2: Verteilung der Regenwürmer (*E. fetida*) im Vermeidungstest zu Gärprodukten der Kategorie 1 (Lieferung **Oktober 2014**) auf Kontroll- und Substratseite im Testcontainer. Fehlerbalken stellen Standardabweichung dar. „200“ = Aufwandmenge entsprechend 200 kg ha<sup>-1</sup> N (blau-rote Balken); „400“ = Aufwandmenge 400 kg ha<sup>-1</sup> N (grün-gelbe Balken); Fein = Feinfraktion; Agglo = Agglomerate; SM = Stallmist. ....CXLV
- Abbildung A 3: Verteilung der Regenwürmer (*A. caliginosa*) im Vermeidungstest zu Gärprodukten der Kategorie 1 (Lieferung **Oktober 2014**) auf Kontroll- und Substratseite im Testcontainer. Fehlerbalken stellen Standardabweichung dar. „200“ = Aufwandmenge entsprechend 200 kg ha<sup>-1</sup> N (blau-rote Balken); „400“ = Aufwandmenge 400 kg ha<sup>-1</sup> N (grün-gelbe Balken); Fein = Feinfraktion; Agglo = Agglomerate; SM = Stallmist. ....CXLVI
- Abbildung A 4: Verteilung der Regenwürmer (*E. fetida*) im Vermeidungstest zu Gärprodukten der Kategorie 1 (Lieferung **Juni 2015**) auf Kontroll- und Substratseite im Testcontainer. Fehlerbalken stellen Standardabweichung dar. „200“ = Aufwandmenge entsprechend 200 kg ha<sup>-1</sup> N (blau-rote Balken); „400“ = Aufwandmenge 400 kg ha<sup>-1</sup> N (grün-gelbe Balken); Fein = Feinfraktion; Grob = Grobfraktion; Agglo = Agglomerate; SM = Stallmist. ....CXLVI
- Abbildung A 5: Verteilung der Regenwürmer (*E. fetida*) im Vermeidungstest zu Gärprodukten der Kategorie 1 (Lieferung **Oktober 2015**) auf Kontroll- und Substratseite im Testcontainer. Fehlerbalken stellen Standardabweichung dar. „200“ = Aufwandmenge entsprechend 200 kg ha<sup>-1</sup> N (blau-rote Balken); „400“ = Aufwandmenge 400 kg ha<sup>-1</sup> N (grün-gelbe Balken); Fein = Feinfraktion; Grob = Grobfraktion; Agglo = Agglomerate; SM = Stallmist. ....CXLVII
- Abbildung A 6: Verteilung der Regenwürmer im Vermeidungstest zu Gärprodukten der Kategorie 2 (Lieferung **2016**) auf Kontroll- und Substratseite im

|   |         |
|---|---------|
| Testcontainer. Fehlerbalken stellen Standardabweichung dar. „200“ = Aufwandmenge entsprechend 200 kg ha <sup>-1</sup> N (blau-rote Balken); „400“ = Aufwandmenge 400 kg ha <sup>-1</sup> N (grün-gelbe Balken); AggloGr = Agglomerate aus Bioabfallgärrest; TM = Tiermehl. .... | CXLVII  |
| Abbildung A 7: Entwicklung der Wuchshöhe bei Hafer im Gefäßversuch <b>2015</b> (Aufwandmenge entsprechend 1 g Gefäß <sup>-1</sup> N) .....  | CXLVIII |
| Abbildung A 8: Entwicklung der Wuchshöhe bei Raps im Gefäßversuch <b>2015</b> (Aufwandmenge entsprechend 1 g Gefäß <sup>-1</sup> N) .....   | CXLVIII |
| Abbildung A 9: Entwicklung der Wuchshöhe bei Raps im Gefäßversuch <b>2015</b> (Aufwandmenge entsprechend 3 g Gefäß <sup>-1</sup> N) .....   | CXLIX   |
| Abbildung A 10: Parzellenplan des Feldversuchs in Berge .....   | CL      |

## Tabellenverzeichnis

|  |       |
|--|-------|
| Tabelle A 1: pH-Werte und Feuchtigkeitsgehalt des Bodens in den Vermeidungstests mit Gärprodukten der Kategorie 1 jeweils nach Versuchsende .....  | CL    |
| Tabelle A 2: pH-Werte und Feuchtigkeitsgehalt des Bodens in den Vermeidungstests mit Gärprodukten der Kategorie 2 jeweils nach Versuchsende .....  | CL    |
| Tabelle A 3: p-Werte aus der zweifaktoriellen Varianzanalyse der phytotoxikologischen Tests (Signifikanzschwelle $p \leq 0,05$ ). Signifikante Effekte sind zur besseren Übersichtlichkeit fett gedruckt. ....   | CLII  |
| Tabelle A 4: Aufgang, Wuchshöhe und Biomasseertrag im phytotoxikologischen Test mit Gärprodukten der Kategorie 1 (Lieferung <b>Juni 2015</b> ). Daten sind dargestellt als Mittelwerte $\pm$ SD. (Werte ohne SD: Nur in einem Gefäß überlebende Pflanzen, deswegen keine Wiederholungen; Zellen ohne Werte: keine überlebende Pflanzen in den vier Gefäßen dieser Variante). Unterschiedliche Buchstaben innerhalb einer Spalte markieren signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen für diese Aufwandmenge für den jeweiligen Parameter (Tukey's HSD Test, $P \leq 0.05$ ). <i>Zellen in Kursiv: Daten wurden nicht in die statistische Auswertung einbezogen.</i> ..... | CLIII |
| Tabelle A 5: Gehalte an Gesamt-, organischem und heißwasserlöslichem Kohlenstoff und pH-Werte des Bodens im Gefäßversuch mit Raps im Jahr 2016. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer Spalte (Tukey's Test, $p \leq 0,05$ ). ....   | CLIV  |
| Tabelle A 6: Nährstoffentzüge durch Senf, Roggen, Mais und Weizen im Feldversuch. Daten sind Mittelwerte aus vier Wiederholungen $\pm$ Standardabweichung. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer  |       |

|              |  |      |
|--------------|--|------|
|              | Spalte für das jeweilige Nährelement (Tukey's HSD Test, $p \leq 0,05$ ).....   | CLV  |
| Tabelle A 7: | Richtwerte für die Gehalte an Stickstoff, Phosphor und Kalium im Erntegut von Senf, Mais, Roggen und Weizen, verändert nach LfL (2013a) und Fritsch (2012) ..... | CLVI |

## Abbildungen

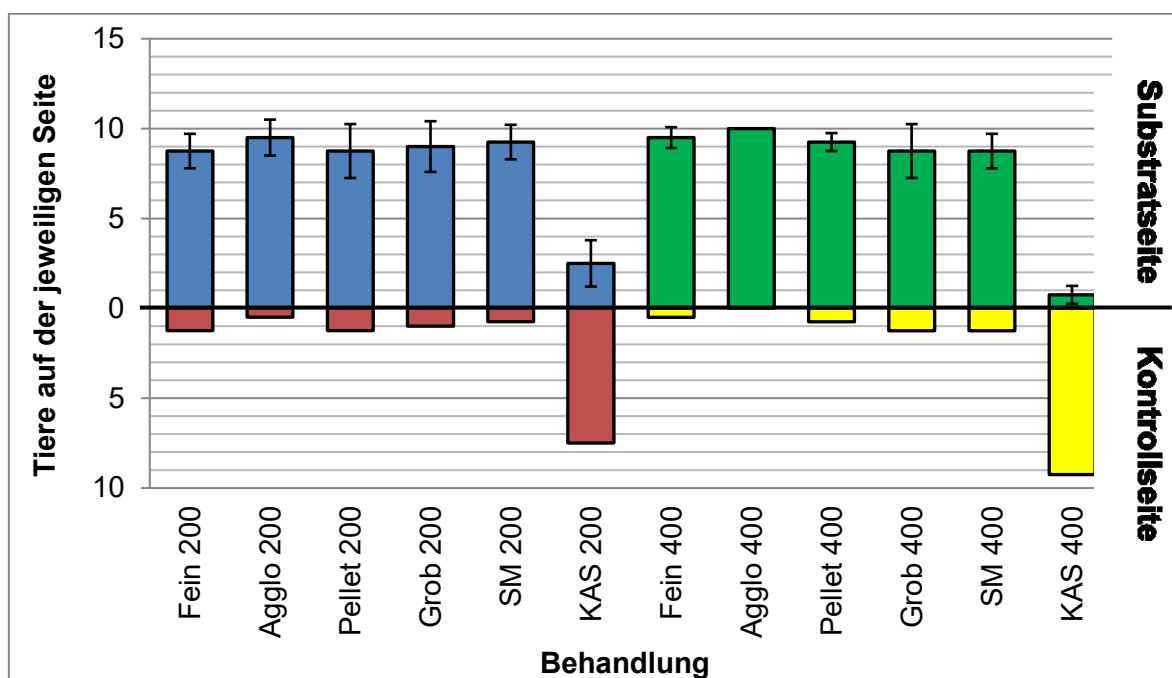


Abbildung A 1: Verteilung der Regenwürmer (*E. fetida*) im Vermeidungstest zu Gärprodukten der Kategorie 1 (Lieferung **Juni 2014**) auf Kontroll- und Substratseite im Testcontainer. Fehlerbalken stellen Standardabweichung dar. „200“ = Aufwandmenge entsprechend 200 kg ha<sup>-1</sup> N (blau-rote Balken); „400“ = Aufwandmenge 400 kg ha<sup>-1</sup> N (grün-gelbe Balken); Fein = Feinfraktion; Grob = Grobfraktion; Agglo = Agglomerate; SM = Stallmist.

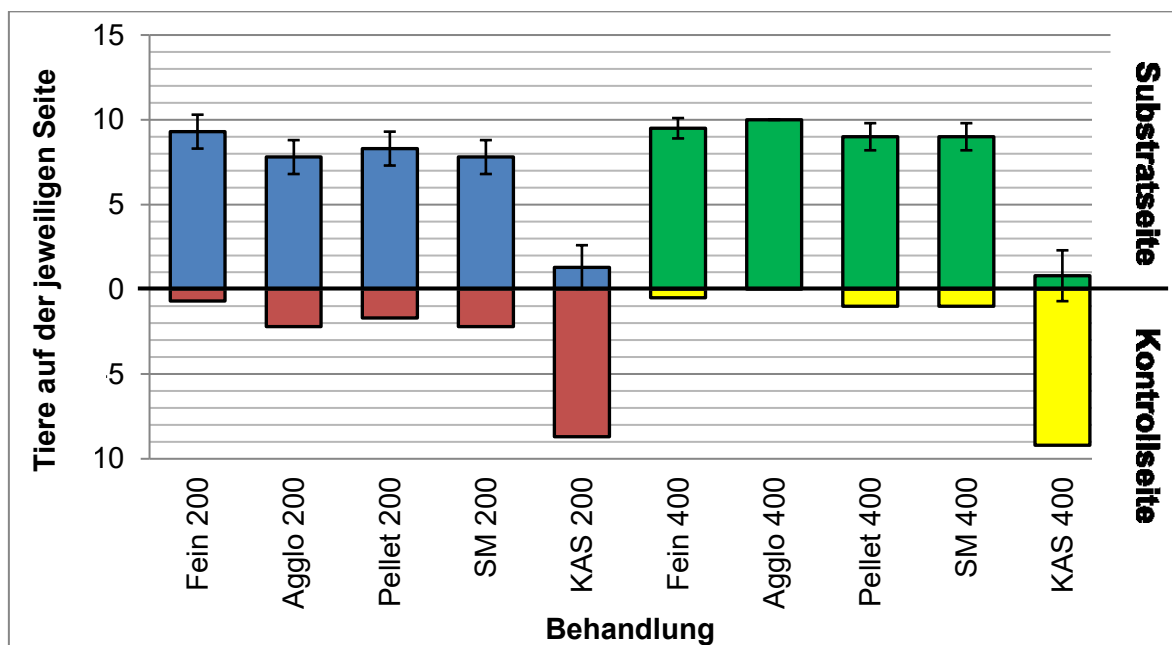


Abbildung A 2: Verteilung der Regenwürmer (*E. fetida*) im Vermeidungstest zu Gärprodukten der Kategorie 1 (Lieferung **Oktober 2014**) auf Kontroll- und Substratseite im Testcontainer. Fehlerbalken stellen Standardabweichung dar. „200“ = Aufwandmenge entsprechend 200 kg ha<sup>-1</sup> N (blau-rote Balken); „400“ = Aufwandmenge 400 kg ha<sup>-1</sup> N (grün-gelbe Balken); Fein = Feinfraktion; Agglo = Agglomerate; SM = Stallmist.

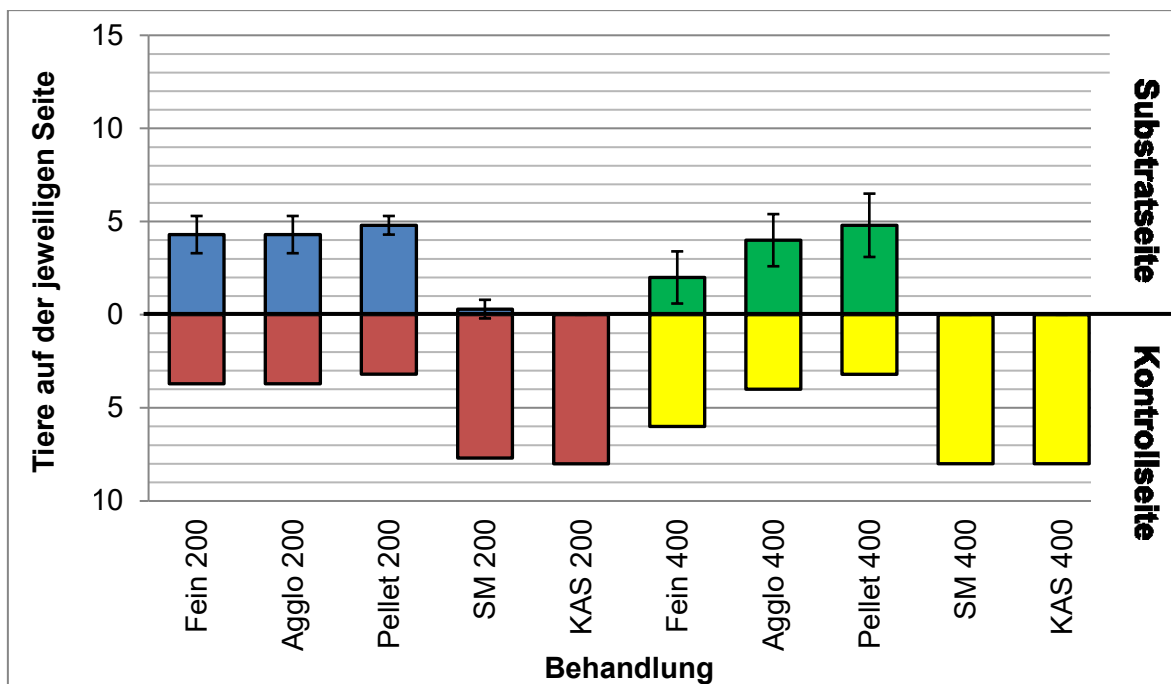


Abbildung A 3: Verteilung der Regenwürmer (*A. caliginosa*) im Vermeidungstest zu Gärprodukten der Kategorie 1 (Lieferung **Oktober 2014**) auf Kontroll- und Substratseite im Testcontainer. Fehlerbalken stellen Standardabweichung dar. „200“ = Aufwandmenge entsprechend 200 kg ha<sup>-1</sup> N (blau-rote Balken); „400“ = Aufwandmenge 400 kg ha<sup>-1</sup> N (grün-gelbe Balken); Fein = Feinfraktion; Agglo = Agglomerate; SM = Stallmist.

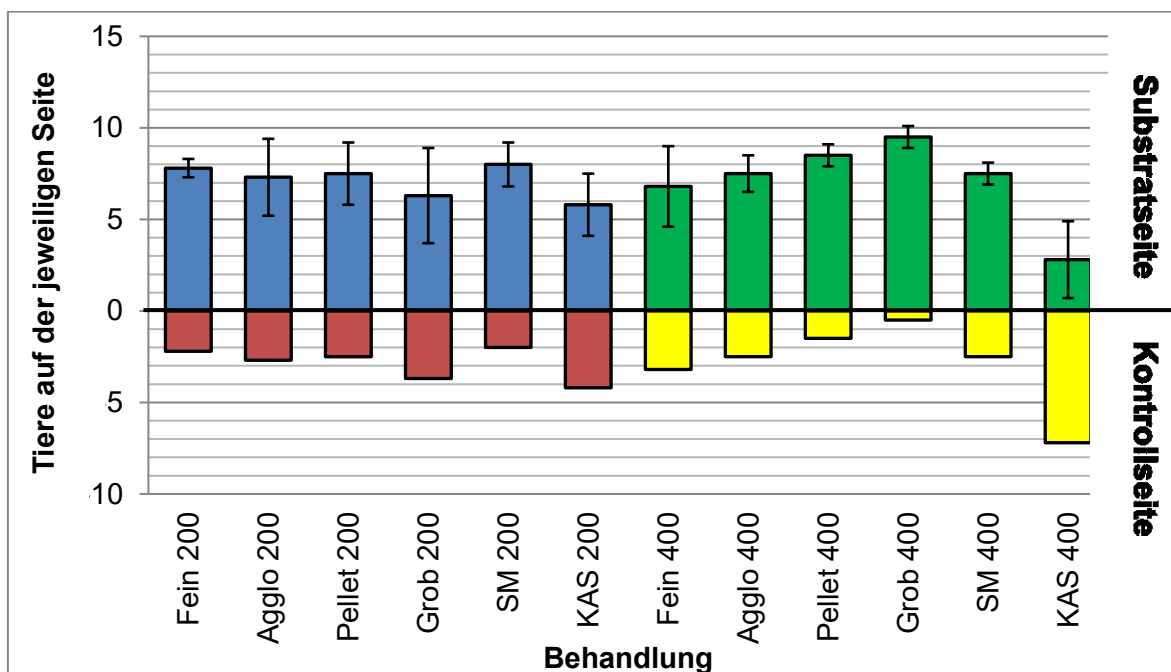


Abbildung A 4: Verteilung der Regenwürmer (*E. fetida*) im Vermeidungstest zu Gärprodukten der Kategorie 1 (Lieferung **Juni 2015**) auf Kontroll- und Substratseite im Testcontainer. Fehlerbalken stellen Standardabweichung dar. „200“ = Aufwandmenge entsprechend 200 kg ha<sup>-1</sup> N (blau-rote Balken); „400“ = Aufwandmenge 400 kg ha<sup>-1</sup> N (grün-gelbe Balken); Fein = Feinfraktion; Grob = Grobfraktion; Agglo = Agglomerate; SM = Stallmist.

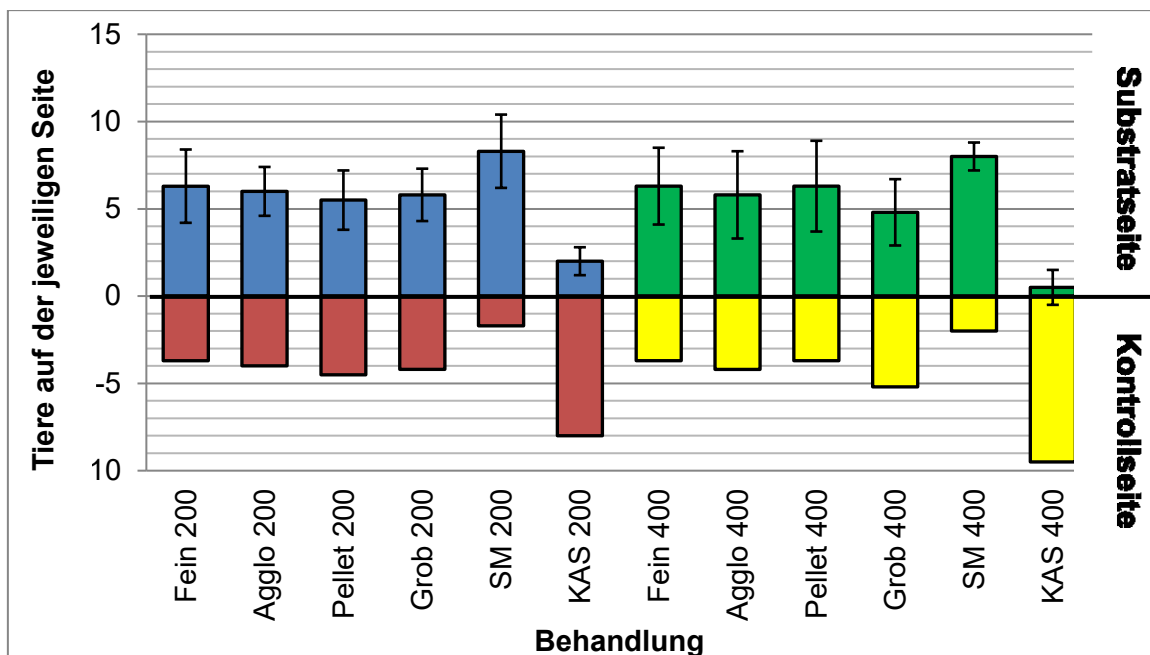


Abbildung A 5: Verteilung der Regenwürmer (*E. fetida*) im Vermeidungstest zu Gärprodukten der Kategorie 1 (Lieferung **Oktober 2015**) auf Kontroll- und Substratseite im Testcontainer. Fehlerbalken stellen Standardabweichung dar. „200“ = Aufwandmenge entsprechend 200 kg ha<sup>-1</sup> N (blau-rote Balken); „400“ = Aufwandmenge 400 kg ha<sup>-1</sup> N (grün-gelbe Balken); Fein = Feinfraktion; Grob = Grobfraktion; Agglo = Agglomerate; SM = Stallmist.

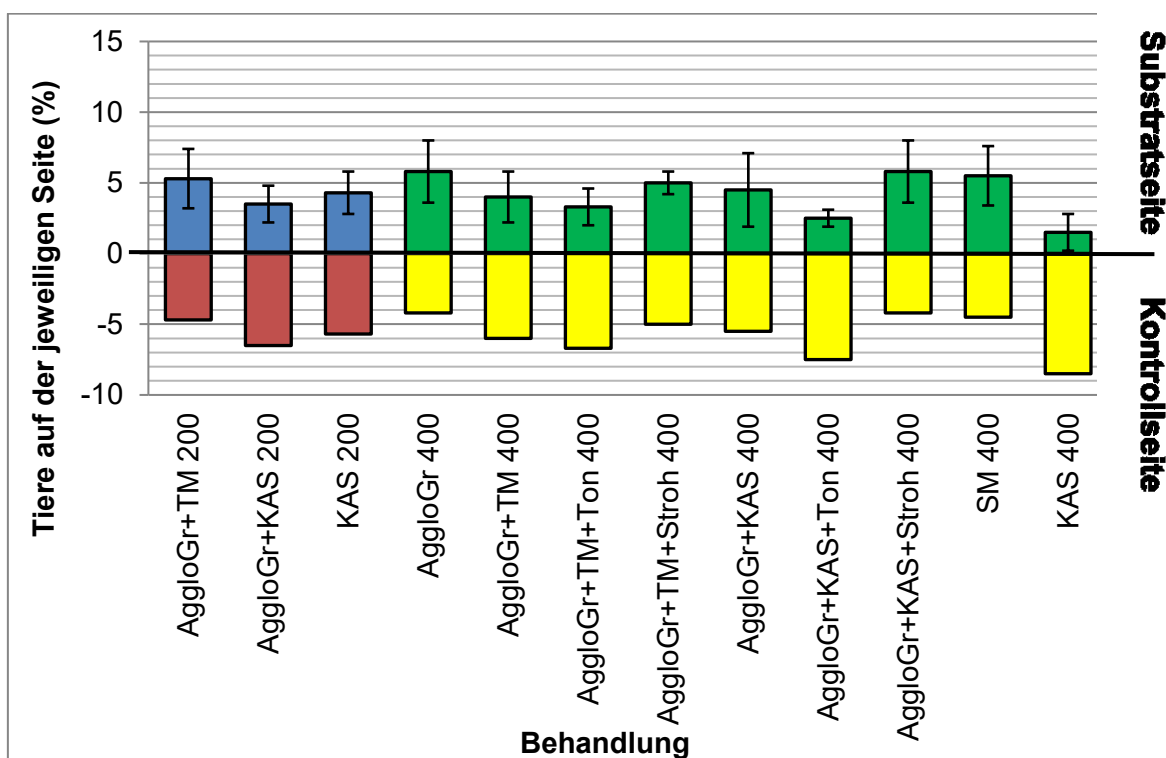


Abbildung A 6: Verteilung der Regenwürmer im Vermeidungstest zu Gärprodukten der Kategorie 2 (Lieferung **2016**) auf Kontroll- und Substratseite im Testcontainer. Fehlerbalken stellen Standardabweichung dar. „200“ = Aufwandmenge entsprechend 200 kg ha<sup>-1</sup> N (blau-rote Balken); „400“ = Aufwandmenge 400 kg ha<sup>-1</sup> N (grün-gelbe Balken); AggloGr = Agglomerate aus Bioabfallgärrest; TM = Tiermehl.

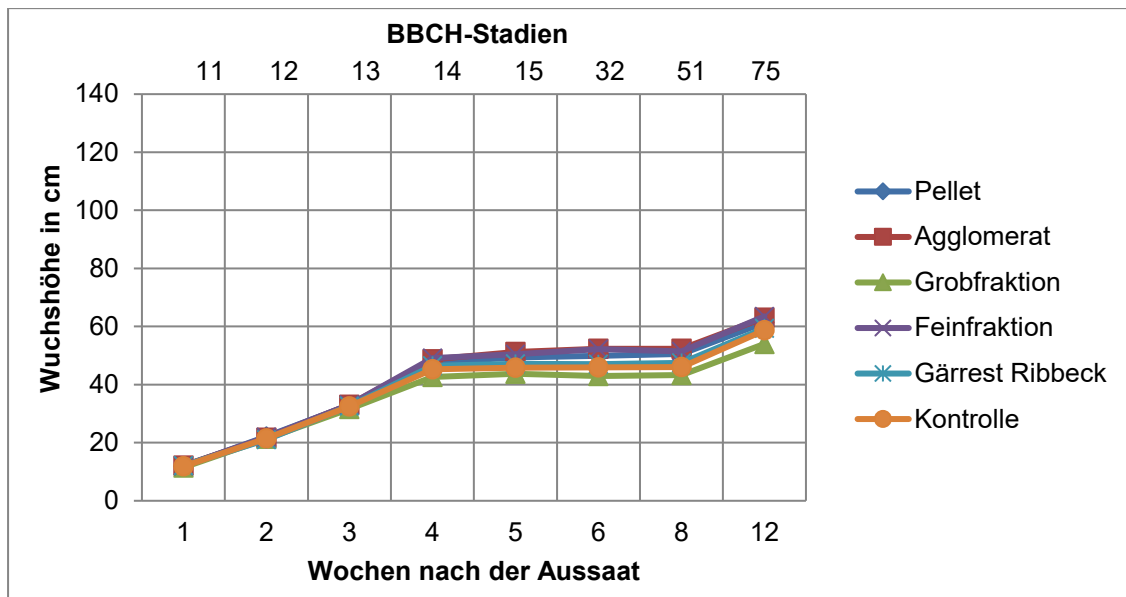


Abbildung A 7: Entwicklung der Wuchshöhe bei Hafer im Gefäßversuch **2015** (Aufwandmenge entsprechend 1 g Gefäß<sup>-1</sup> N)

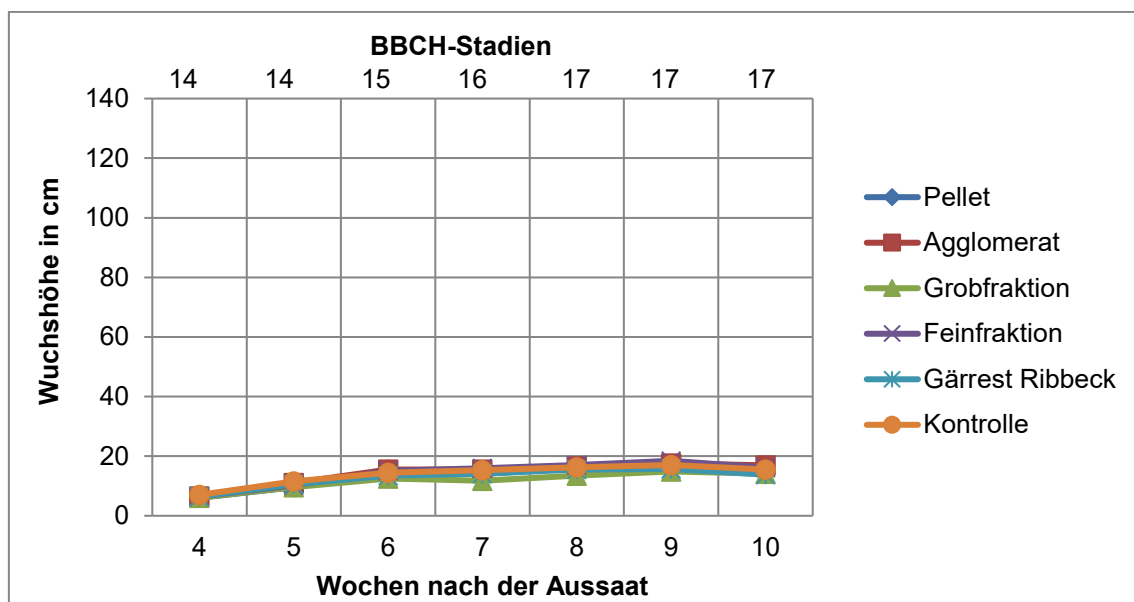


Abbildung A 8: Entwicklung der Wuchshöhe bei Raps im Gefäßversuch **2015** (Aufwandmenge entsprechend 1 g Gefäß<sup>-1</sup> N)

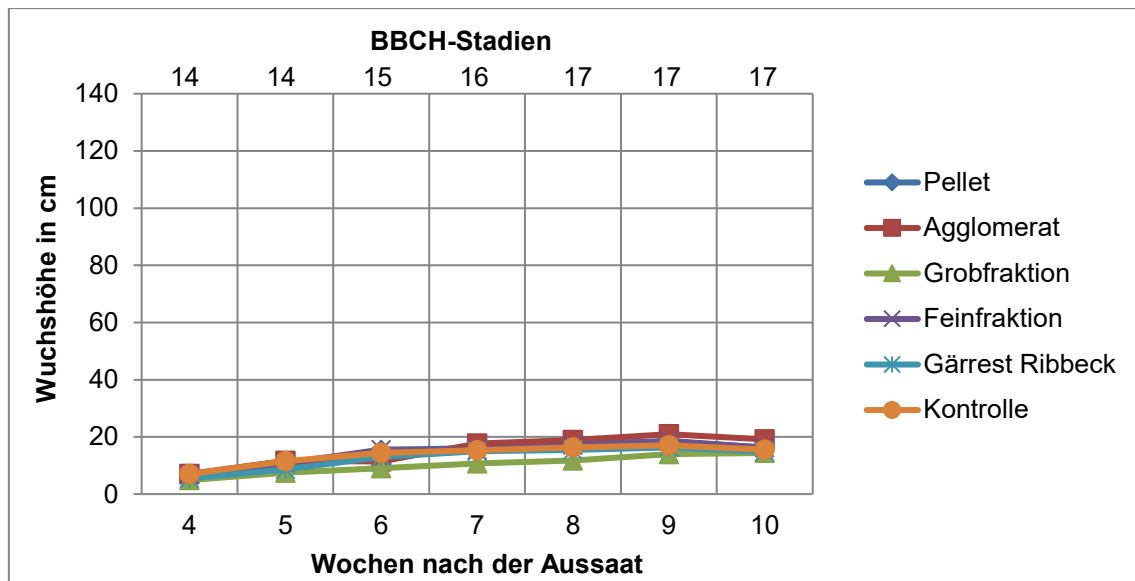


Abbildung A 9: Entwicklung der Wuchshöhe bei Raps im Gefäßversuch **2015** (Aufwandmenge entsprechend 3 g Gefäß<sup>-1</sup> N)



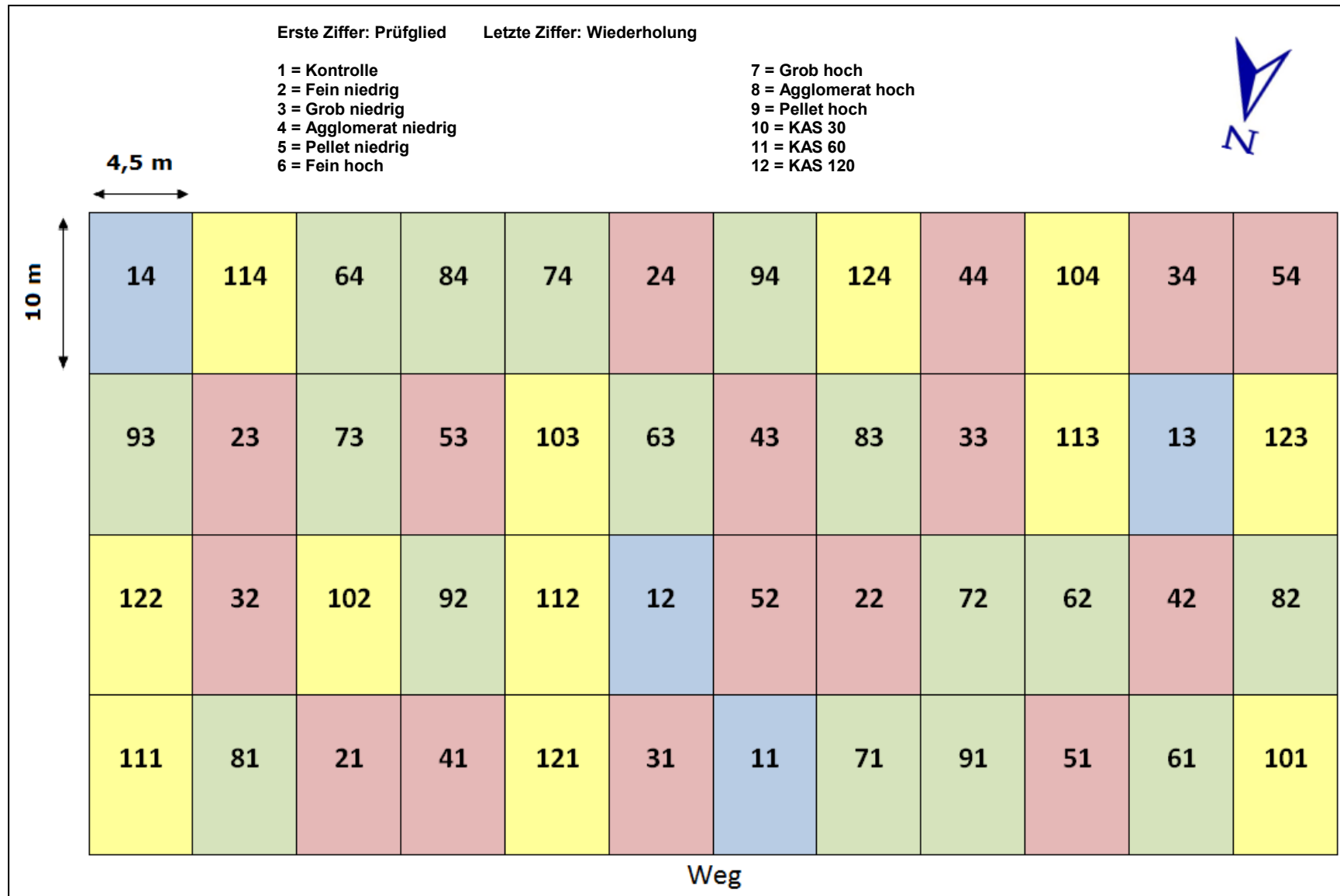


Abbildung A 10: Parzellenplan des Feldversuchs in Berge

## Tabellen

Tabelle A 1: pH-Werte und Feuchtigkeitsgehalt des Bodens in den Vermeidungstests mit Gärprodukten der Kategorie 1 jeweils nach Versuchsende

| Dünge-pro-<br>dukt                        | Aufwandmenge                                    | pH-Wert nach Versuchsende |           |           |
|---|---|---------------------------|-----------|-----------|
|   |   | Juni 2014                 | Juni 2015 | Okt. 2015 |
| Kontrolle                                 |   | 6,1                       | 5,9       | 6,3       |
| Feinfraktion                              | 200 kg ha <sup>-1</sup> N (Juni 2014)           | 6,3                       | 5,9       | 6,2       |
| Agglomerat                                |   | 6,3                       | 5,9       | 6,3       |
| Pellet                                    | 5 t ha <sup>-1</sup> TM (Juni u. Oktober 2015)  | 6,1                       | 5,9       | 6,2       |
| Grobfraktion                              |   | 6,2                       | 5,9       | 6,3       |
| Stallmist                                 |   | 6,7                       | 6,0       | 6,5       |
| KAS                                       | 200 kg ha <sup>-1</sup> N                       | 6,4                       | 6,0       | 6,3       |
| Feinfraktion                              | 400 kg ha <sup>-1</sup> N                       | 6,5                       | 6,1       | 6,2       |
| Agglomerat                                |   | 6,6                       | 6,1       | 6,3       |
| Pellet                                    | 10 t ha <sup>-1</sup> TM (Juni u. Oktober 2015) | 6,1                       | 6,0       | 6,2       |
| Grobfraktion                              |   | 6,4                       | 6,2       | 6,2       |
| Stallmist                                 |   | 7,2                       | 6,3       | 6,5       |
| KAS                                       | 400 kg ha <sup>-1</sup> N                       | 6,7                       | 6,5       | 6,4       |
| <b>Bodenfeuchte (%) nach Versuchsende</b> |   | 85,8-87,1                 | 86,6-89,2 | 85,1-89,8 |

Tabelle A 2: pH-Werte und Feuchtigkeitsgehalt des Bodens in den Vermeidungstests mit Gärprodukten der Kategorie 2 jeweils nach Versuchsende

| Düngeprodukt                       | Aufwandmenge<br>kg ha <sup>-1</sup> N | pH-Wert nach Ver-<br>suchsende |
|------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| Kontrolle                          | -                                     | 6,3                            |
| AggloGr + TM                       | 200                                   | 6,6                            |
| AggloGr + KAS                      |                                       | 6,4                            |
| KAS                                |                                       | 6,5                            |
| AggloGr                            | 400                                   | 6,4                            |
| AggloGr + TM                       |                                       | 7,0                            |
| AggloGr + TM + Ton                 |                                       | 6,9                            |
| AggloGr + TM + Stroh               |                                       | 6,4                            |
| AggloGr + KAS                      |                                       | 6,3                            |
| AggloGr + KAS + Ton                |                                       | 6,4                            |
| AggloGr + KAS + Stroh              |                                       | 6,3                            |
| Stallmist                          |                                       | 6,2                            |
| KAS                                |                                       | 6,7                            |
| Bodenfeuchte (%) nach Versuchsende |                                       | 85,6-88,3                      |

Tabelle A 3: p-Werte aus der zweifaktoriellen Varianzanalyse der phytotoxikologischen Tests (Signifikanzschwelle  $p \leq 0,05$ ). Signifikante Effekte sind zur besseren Übersichtlichkeit fett gedruckt.

| Test         |        | Faktor                    | p-Werte          |                  |                  |
|--------------|--------|---------------------------|------------------|------------------|------------------|
|              |        |                           | Aufgang          | Wuchshöhe        | Ertrag           |
| Juni 2014    | Rübsen | Düngeprodukt              | <b>&lt;0,001</b> | <b>&lt;0,001</b> | <b>&lt;0,001</b> |
|              |        | Aufwandmenge              | <b>&lt;0,001</b> | <b>&lt;0,001</b> | <b>&lt;0,001</b> |
|              |        | Düngeprodukt*Aufwandmenge | <b>0,005</b>     | <b>&lt;0,001</b> | <b>&lt;0,001</b> |
|              | Hafer  | Düngeprodukt              | 0,492            | 0,396            | 0,351            |
|              |        | Aufwandmenge              | <b>0,026</b>     | 0,117            | <b>0,028</b>     |
|              |        | Düngeprodukt*Aufwandmenge | 0,322            | 0,554            | 0,316            |
| Juni 2015    | Rübsen | Düngeprodukt              | -                | -                | -                |
|              |        | Aufwandmenge              | -                | -                | -                |
|              |        | Düngeprodukt*Aufwandmenge | -                | -                | -                |
|              | Hafer  | Düngeprodukt              | 0,770            | 0,447            | 0,283            |
|              |        | Aufwandmenge              | <b>0,049</b>     | <b>0,005</b>     | 0,080            |
|              |        | Düngeprodukt*Aufwandmenge | 0,499            | 0,508            | 0,803            |
| Oktober 2015 | Rübsen | Düngeprodukt              | <b>0,005</b>     | <b>0,003</b>     | <b>0,002</b>     |
|              |        | Aufwandmenge              | <b>0,009</b>     | <b>0,040</b>     | <b>&lt;0,001</b> |
|              |        | Düngeprodukt*Aufwandmenge | 0,139            | <b>0,002</b>     | <b>0,015</b>     |
|              | Hafer  | Düngeprodukt              | <b>0,030</b>     | <b>&lt;0,001</b> | <b>0,068</b>     |
|              |        | Aufwandmenge              | 0,497            | <b>0,007</b>     | <b>0,034</b>     |
|              |        | Düngeprodukt*Aufwandmenge | 0,414            | 0,530            | 0,397            |
| 2016         | Rübsen | Düngeprodukt              | <b>&lt;0,001</b> | 0,102            | 0,342            |
|              |        | Aufwandmenge              | <b>&lt;0,001</b> | <b>&lt;0,001</b> | <b>&lt;0,001</b> |
|              |        | Düngeprodukt*Aufwandmenge | <b>&lt;0,001</b> | <b>&lt;0,001</b> | 0,408            |
|              | Hafer  | Düngeprodukt              | <b>&lt;0,001</b> | <b>&lt;0,001</b> | <b>&lt;0,001</b> |
|              |        | Aufwandmenge              | <b>&lt;0,001</b> | <b>&lt;0,001</b> | <b>&lt;0,001</b> |
|              |        | Düngeprodukt*Aufwandmenge | <b>&lt;0,001</b> | <b>0,001</b>     | <b>0,004</b>     |

Tabelle A 4: Aufgang, Wuchshöhe und Biomasseertrag im phytotoxikologischen Test mit Gärprodukten der Kategorie 1 (Lieferung **Juni 2015**). Daten sind dargestellt als Mittelwerte  $\pm$  SD. (Werte ohne SD: Nur in einem Gefäß überlebende Pflanzen, deswegen keine Wiederholungen; Zellen ohne Werte: keine überlebende Pflanzen in den vier Gefäßen dieser Variante). Unterschiedliche Buchstaben innerhalb einer Spalte markieren signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen für diese Aufwandmenge für den jeweiligen Parameter (Tukey's HSD Test,  $P \leq 0.05$ ). *Zellen in Kursiv: Daten wurden nicht in die statistische Auswertung einbezogen.*

| Pflanzenart   |              | Rübsen          |                 |                 |                 |                 | Hafer                        |                              |                              |                              |                              |
|---|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Aufwandmenge<br>(t ha <sup>-1</sup> TM bzw.<br>für KAS kg ha <sup>-1</sup> N) |              | 5 bzw.<br>100   | 10 bzw.<br>200  | 15 bzw.<br>400  | 20 bzw.<br>600  | 25 bzw.<br>900  | 5 bzw.<br>100                | 10 bzw.<br>200               | 15 bzw.<br>400               | 20 bzw.<br>600               | 25 bzw.<br>900               |
| Aufgang<br>(% der Kontrolle)  | Kontrolle    | 100 $\pm$ 71    | 100 $\pm$ 71    | 100 $\pm$ 71    | 100 $\pm$ 71    | 100 $\pm$ 71    | 100 $\pm$ 15 <sup>a</sup>    | 100 $\pm$ 15 <sup>a</sup>    | 100 $\pm$ 15 <sup>a</sup>    | 100 $\pm$ 15 <sup>a</sup>    | 100 $\pm$ 15 <sup>a</sup>    |
|   | Feinfraktion | 175 $\pm$ 133   | 138 $\pm$ 132   | 88 $\pm$ 48     | 50 $\pm$ 71     | 238 $\pm$ 111   | 94 $\pm$ 16 <sup>a</sup>     | 99 $\pm$ 14 <sup>a</sup>     | 94 $\pm$ 20 <sup>a</sup>     | 83 $\pm$ 26 <sup>a</sup>     | 99 $\pm$ 8 <sup>a</sup>      |
|   | Agglomerate  | 25 $\pm$ 50     | 13 $\pm$ 25     | 38 $\pm$ 48     | 38 $\pm$ 25     | 63 $\pm$ 95     | 88 $\pm$ 27 <sup>a</sup>     | 99 $\pm$ 14 <sup>a</sup>     | 104 $\pm$ 0 <sup>a</sup>     | 96 $\pm$ 14 <sup>a</sup>     | 99 $\pm$ 14 <sup>a</sup>     |
|   | Pellets      | 138 $\pm$ 103   | 63 $\pm$ 48     | 88 $\pm$ 48     | 38 $\pm$ 48     | 0 $\pm$ 0       | 104 $\pm$ 0 <sup>a</sup>     | 96 $\pm$ 14 <sup>a</sup>     | 96 $\pm$ 14 <sup>a</sup>     | 86 $\pm$ 18 <sup>a</sup>     | 91 $\pm$ 14 <sup>a</sup>     |
|   | Grobfraktion | 250 $\pm$ 147   | 213 $\pm$ 125   | 200 $\pm$ 141   | 175 $\pm$ 65    | 238 $\pm$ 103   | 96 $\pm$ 14 <sup>a</sup>     | 101 $\pm$ 7 <sup>a</sup>     | 96 $\pm$ 14 <sup>a</sup>     | 94 $\pm$ 16 <sup>a</sup>     | 83 $\pm$ 16 <sup>a</sup>     |
|   | KAS          | 163 $\pm$ 229   | 25 $\pm$ 50     | 100 $\pm$ 82    | 88 $\pm$ 85     | 88 $\pm$ 85     | 99 $\pm$ 14                  | 83 $\pm$ 57                  | 94 $\pm$ 20                  | 78 $\pm$ 8                   | 68 $\pm$ 43                  |
| Wuchshöhe<br>(cm)   | Kontrolle    | 9 $\pm$ 4       | 9 $\pm$ 4       | 9 $\pm$ 4       | 9 $\pm$ 4       | 9 $\pm$ 4       | 19 $\pm$ 3 <sup>a</sup>      | 19 $\pm$ 3 <sup>a</sup>      | 19 $\pm$ 3 <sup>a</sup>      | 19 $\pm$ 3 <sup>a</sup>      | 19 $\pm$ 3 <sup>a</sup>      |
|   | Feinfraktion | 9 $\pm$ 2       | 13 $\pm$ 3      | 7 $\pm$ 7       | 8 $\pm$ 1       | 11 $\pm$ 2      | 16 $\pm$ 2 <sup>a</sup>      | 19 $\pm$ 3 <sup>a</sup>      | 17 $\pm$ 1 <sup>a</sup>      | 18 $\pm$ 2 <sup>a</sup>      | 18 $\pm$ 3 <sup>a</sup>      |
|   | Agglomerate  | 14              | 15              | 5 $\pm$ 0       | 8 $\pm$ 5       | 8 $\pm$ 3       | 16 $\pm$ 1 <sup>a</sup>      | 19 $\pm$ 1 <sup>a</sup>      | 16 $\pm$ 1 <sup>a</sup>      | 19 $\pm$ 4 <sup>a</sup>      | 19 $\pm$ 1 <sup>a</sup>      |
|   | Pellets      | 8 $\pm$ 3       | 12 $\pm$ 3      | 8 $\pm$ 4       | 17 $\pm$ 7      | -               | 18 $\pm$ 2 <sup>a</sup>      | 18 $\pm$ 1 <sup>a</sup>      | 17 $\pm$ 2 <sup>a</sup>      | 16 $\pm$ 2 <sup>a</sup>      | 17 $\pm$ 1 <sup>a</sup>      |
|   | Grobfraktion | 11 $\pm$ 4      | 9 $\pm$ 2       | 11 $\pm$ 4      | 11 $\pm$ 2      | 9 $\pm$ 3       | 18 $\pm$ 1 <sup>a</sup>      | 18 $\pm$ 2 <sup>a</sup>      | 16 $\pm$ 2 <sup>a</sup>      | 17 $\pm$ 2 <sup>a</sup>      | 17 $\pm$ 2 <sup>a</sup>      |
|   | KAS          | 16 $\pm$ 5      | 15 $\pm$ 10     | 20 $\pm$ 4      | 17 $\pm$ 2      | 8 $\pm$ 6       | 29 $\pm$ 2                   | 34 $\pm$ 4                   | 33 $\pm$ 2                   | 30 $\pm$ 1                   | 22 $\pm$ 7                   |
| Ertrag<br>(g je Gefäß TM)   | Kontrolle    | 0,24 $\pm$ 0,18 | 0,24 $\pm$ 0,18 | 0,24 $\pm$ 0,18 | 0,24 $\pm$ 0,18 | 0,24 $\pm$ 0,18 | 0,12 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup> | 0,12 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup> | 0,12 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup> | 0,12 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup> | 0,12 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup> |
|   | Feinfraktion | 0,25 $\pm$ 0,16 | 0,49 $\pm$ 0,01 | 0,14 $\pm$ 0,18 | 0,14 $\pm$ 0,14 | 0,40 $\pm$ 0,07 | 0,09 $\pm$ 0,03 <sup>a</sup> | 0,13 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup> | 0,11 $\pm$ 0,01 <sup>a</sup> | 0,10 $\pm$ 0,03 <sup>a</sup> | 0,11 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup> |
|   | Agglomerate  | 0,21            | 0,14            | 0,03 $\pm$ 0,02 | 0,08 $\pm$ 0,07 | 0,18 $\pm$ 0,01 | 0,12 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup> | 0,12 $\pm$ 0,01 <sup>a</sup> | 0,11 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup> | 0,13 $\pm$ 0,06 <sup>a</sup> | 0,13 $\pm$ 0,03 <sup>a</sup> |
|   | Pellets      | 0,27 $\pm$ 0,22 | 0,17 $\pm$ 0,03 | 0,12 $\pm$ 0,15 | 0,41 $\pm$ 0,07 | -               | 0,12 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup> | 0,11 $\pm$ 0,03 <sup>a</sup> | 0,10 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup> | 0,11 $\pm$ 0,03 <sup>a</sup> | 0,10 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup> |
|   | Grobfraktion | 0,47 $\pm$ 0,23 | 0,42 $\pm$ 0,27 | 0,49 $\pm$ 0,16 | 0,58 $\pm$ 0,37 | 0,37 $\pm$ 0,23 | 0,13 $\pm$ 0,03 <sup>a</sup> | 0,12 $\pm$ 0,03 <sup>a</sup> | 0,08 $\pm$ 0,03 <sup>a</sup> | 0,11 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup> | 0,09 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup> |
|   | KAS          | 0,97 $\pm$ 0,82 | 0,68 $\pm$ 0,87 | 1,57 $\pm$ 0,79 | 0,66 $\pm$ 0,45 | 0,20 $\pm$ 0,20 | 0,23 $\pm$ 0,08              | 0,31 $\pm$ 0,03              | 0,20 $\pm$ 0,05              | 0,14 $\pm$ 0,04              | 0,12 $\pm$ 0,02              |

Tabelle A 5: Gehalte an Gesamt-, organischem und heißwasserlöslichem Kohlenstoff und pH-Werte des Bodens im Gefäßversuch mit Raps im Jahr 2016. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer Spalte (Tukey's Test,  $p \leq 0,05$ ).

| Probe-<br>nahme            | Variante          | N je<br>Gefäß<br>(g) | C <sub>ges</sub>           | C <sub>org</sub>           | C <sub>hwI</sub>          | pH-Wert                 |
|----------------------------|-------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------|
|                            |                   |                      | % TM                       |                            | g kg <sup>-1</sup>        |                         |
| Boden vor Versuchsbeginn   |                   |                      | 1,87 ± 0,11 <sup>ab</sup>  | 1,03 ± 0,03 <sup>a</sup>   | 0,50 ± 0,04 <sup>a</sup>  | 7,2 ± 0,1 <sup>a</sup>  |
| Nach der Ernte von<br>Raps | AggloGr+TM        | 3                    | 1,93 ± 0,09 <sup>ab</sup>  | 1,11 ± 0,04 <sup>ab</sup>  | 0,98 ± 0,19 <sup>c</sup>  | 7,3 ± 0,1 <sup>ab</sup> |
|                            | AggloGr+TM+Ton    |                      | 1,96 ± 0,09 <sup>ab</sup>  | 1,12 ± 0,03 <sup>ab</sup>  | 0,90 ± 0,05 <sup>bc</sup> | 7,3 ± 0,1 <sup>ab</sup> |
|                            | AggloGr+TM+ Stroh |                      | 1,98 ± 0,03 <sup>ab</sup>  | 1,13 ± 0,05 <sup>ab</sup>  | 1,00 ± 0,14 <sup>c</sup>  | 7,4 ± 0,1 <sup>ab</sup> |
|                            | AggloGr+KAS       |                      | 2,05 ± 0,11 <sup>abc</sup> | 1,24 ± 0,19 <sup>abc</sup> | 0,89 ± 0,03 <sup>bc</sup> | 7,4 ± 0,1 <sup>b</sup>  |
|                            | AggloGr+KAS+Ton   |                      | 2,04 ± 0,09 <sup>abc</sup> | 1,14 ± 0,05 <sup>ab</sup>  | 0,85 ± 0,06 <sup>bc</sup> | 7,3 ± 0,1 <sup>ab</sup> |
|                            | AggloGr+KAS+Stroh |                      | 2,06 ± 0,10 <sup>abc</sup> | 1,20 ± 0,05 <sup>ab</sup>  | 0,85 ± 0,09 <sup>bc</sup> | 7,2 ± 0,2 <sup>ab</sup> |
|                            | Agglo2015         |                      | 2,14 ± 0,10 <sup>bc</sup>  | 1,28 ± 0,06 <sup>bc</sup>  | 0,84 ± 0,02 <sup>bc</sup> | 7,2 ± 0,1 <sup>ab</sup> |
|                            | Pellet2015        |                      | 2,26 ± 0,26 <sup>c</sup>   | 1,44 ± 0,23 <sup>c</sup>   | 1,02 ± 0,10 <sup>c</sup>  | 7,2 ± 0,1 <sup>ab</sup> |
|                            | KAS               |                      | 1,82 ± 0,04 <sup>a</sup>   | 1,05 ± 0,03 <sup>ab</sup>  | 0,83 ± 0,05 <sup>bc</sup> | 7,4 ± 0,1 <sup>ab</sup> |
|                            | Kontrolle         | 0                    | 1,96 ± 0,03 <sup>ab</sup>  | 1,07 ± 0,03 <sup>ab</sup>  | 0,73 ± 0,03 <sup>b</sup>  | 7,2 ± 0,1 <sup>ab</sup> |

Tabelle A 6: Nährstoffentzüge durch Senf, Roggen, Mais und Weizen im Feldversuch. Daten sind Mittelwerte aus vier Wiederholungen  $\pm$  Standardabweichung. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen innerhalb einer Spalte für das jeweilige Nährelement (Tukey's HSD Test,  $p \leq 0,05$ ).

| Nähr-<br>element | Variante  | Entzüge (kg ha <sup>-1</sup> ) durch |                                  |                                   |                                 |                                 |                                 |
|------------------|-----------|--------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
|                  |           | Senf                                 | Roggen                           | Mais                              | Weizen Korn                     | Weizen Stroh                    | Summe Weizen                    |
| Stickstoff       | AN        | 106,86 $\pm$ 35,68 <sup>b</sup>      | 150,13 $\pm$ 12,91 <sup>d</sup>  | 101,05 $\pm$ 19,33 <sup>abc</sup> | 49,58 $\pm$ 3,42 <sup>ab</sup>  | 8,21 $\pm$ 1,35 <sup>ab</sup>   | 57,80 $\pm$ 4,35 <sup>ab</sup>  |
|                  | AH        | 55,12 $\pm$ 10,11 <sup>a</sup>       | 56,54 $\pm$ 5,84 <sup>a</sup>    | 77,08 $\pm$ 13,96 <sup>ab</sup>   | 48,25 $\pm$ 1,73 <sup>ab</sup>  | 6,53 $\pm$ 1,71 <sup>ab</sup>   | 54,78 $\pm$ 2,73 <sup>ab</sup>  |
|                  | PN        | 96,56 $\pm$ 27,31 <sup>ab</sup>      | 145,82 $\pm$ 8,63 <sup>d</sup>   | 106,69 $\pm$ 15,56 <sup>bc</sup>  | 50,10 $\pm$ 4,24 <sup>ab</sup>  | 8,27 $\pm$ 2,07 <sup>ab</sup>   | 58,37 $\pm$ 5,11 <sup>ab</sup>  |
|                  | PH        | 61,99 $\pm$ 16,86 <sup>ab</sup>      | 54,38 $\pm$ 12,02 <sup>a</sup>   | 83,24 $\pm$ 16,39 <sup>ab</sup>   | 49,40 $\pm$ 5,19 <sup>ab</sup>  | 7,77 $\pm$ 2,54 <sup>ab</sup>   | 57,17 $\pm$ 7,42 <sup>ab</sup>  |
|                  | FN        | 98,71 $\pm$ 23,29 <sup>ab</sup>      | 160,63 $\pm$ 22,77 <sup>d</sup>  | 97,96 $\pm$ 7,50 <sup>ab</sup>    | 48,45 $\pm$ 7,33 <sup>ab</sup>  | 7,67 $\pm$ 1,41 <sup>ab</sup>   | 56,13 $\pm$ 7,81 <sup>ab</sup>  |
|                  | FH        | 62,19 $\pm$ 20,81 <sup>ab</sup>      | 61,09 $\pm$ 12,83 <sup>ab</sup>  | 87,95 $\pm$ 6,77 <sup>ab</sup>    | 52,95 $\pm$ 6,73 <sup>ab</sup>  | 7,20 $\pm$ 2,61 <sup>ab</sup>   | 60,15 $\pm$ 9,06 <sup>ab</sup>  |
|                  | GN        | 86,08 $\pm$ 21,56 <sup>ab</sup>      | 139,86 $\pm$ 13,70 <sup>d</sup>  | 98,52 $\pm$ 13,65 <sup>ab</sup>   | 47,87 $\pm$ 4,94 <sup>ab</sup>  | 7,51 $\pm$ 2,01 <sup>ab</sup>   | 55,39 $\pm$ 6,70 <sup>ab</sup>  |
|                  | GH        | 51,71 $\pm$ 9,62 <sup>a</sup>        | 57,21 $\pm$ 7,75 <sup>a</sup>    | 76,84 $\pm$ 11,80 <sup>ab</sup>   | 51,36 $\pm$ 4,36 <sup>ab</sup>  | 7,05 $\pm$ 1,27 <sup>ab</sup>   | 58,41 $\pm$ 5,15 <sup>ab</sup>  |
|                  | KAS 30    | 70,96 $\pm$ 15,60 <sup>ab</sup>      | 97,71 $\pm$ 31,53 <sup>bc</sup>  | 104,34 $\pm$ 4,33 <sup>abc</sup>  | 55,51 $\pm$ 6,18 <sup>b</sup>   | 8,98 $\pm$ 2,25 <sup>ab</sup>   | 64,49 $\pm$ 7,64 <sup>b</sup>   |
|                  | KAS 60    | 71,84 $\pm$ 9,67 <sup>ab</sup>       | 123,00 $\pm$ 11,39 <sup>cd</sup> | 134,23 $\pm$ 10,70 <sup>c</sup>   | 76,88 $\pm$ 0,63 <sup>c</sup>   | 13,63 $\pm$ 2,67 <sup>b</sup>   | 90,51 $\pm$ 2,78 <sup>c</sup>   |
|                  | KAS 120   | 99,03 $\pm$ 12,01 <sup>ab</sup>      | 135,34 $\pm$ 18,49 <sup>cd</sup> | 173,79 $\pm$ 15,28 <sup>d</sup>   | 139,41 $\pm$ 10,97 <sup>d</sup> | 25,06 $\pm$ 8,50 <sup>c</sup>   | 164,47 $\pm$ 16,07 <sup>d</sup> |
|                  | Kontrolle | 53,79 $\pm$ 12,49 <sup>a</sup>       | 43,91 $\pm$ 5,07 <sup>a</sup>    | 71,83 $\pm$ 13,14 <sup>a</sup>    | 40,15 $\pm$ 2,62 <sup>a</sup>   | 4,95 $\pm$ 2,20 <sup>a</sup>    | 45,09 $\pm$ 3,46 <sup>a</sup>   |
| Phosphor         | AN        | 12,48 $\pm$ 1,07 <sup>a</sup>        | 30,09 $\pm$ 5,01 <sup>d</sup>    | 39,99 $\pm$ 3,28 <sup>a</sup>     | 15,55 $\pm$ 0,58 <sup>ab</sup>  | 6,97 $\pm$ 0,84 <sup>a</sup>    | 22,52 $\pm$ 0,71 <sup>ab</sup>  |
|                  | AH        | 10,03 $\pm$ 1,63 <sup>a</sup>        | 12,56 $\pm$ 1,60 <sup>a</sup>    | 40,18 $\pm$ 3,32 <sup>a</sup>     | 15,93 $\pm$ 0,78 <sup>ab</sup>  | 5,17 $\pm$ 0,60 <sup>a</sup>    | 21,10 $\pm$ 1,22 <sup>ab</sup>  |
|                  | PN        | 12,09 $\pm$ 1,42 <sup>a</sup>        | 29,78 $\pm$ 4,01 <sup>d</sup>    | 37,58 $\pm$ 8,19 <sup>a</sup>     | 16,50 $\pm$ 2,90 <sup>ab</sup>  | 6,95 $\pm$ 0,98 <sup>a</sup>    | 23,45 $\pm$ 3,67 <sup>b</sup>   |
|                  | PH        | 9,99 $\pm$ 1,90 <sup>a</sup>         | 11,97 $\pm$ 2,45 <sup>a</sup>    | 44,90 $\pm$ 5,48 <sup>a</sup>     | 16,27 $\pm$ 2,28 <sup>ab</sup>  | 6,23 $\pm$ 0,74 <sup>a</sup>    | 22,50 $\pm$ 2,88 <sup>ab</sup>  |
|                  | FN        | 11,00 $\pm$ 1,25 <sup>a</sup>        | 28,77 $\pm$ 4,06 <sup>cd</sup>   | 38,75 $\pm$ 3,04 <sup>a</sup>     | 17,05 $\pm$ 2,68 <sup>b</sup>   | 6,30 $\pm$ 0,78 <sup>a</sup>    | 23,35 $\pm$ 1,99 <sup>b</sup>   |
|                  | FH        | 10,53 $\pm$ 2,22 <sup>a</sup>        | 14,29 $\pm$ 2,57 <sup>ab</sup>   | 41,81 $\pm$ 4,04 <sup>a</sup>     | 17,14 $\pm$ 1,89 <sup>b</sup>   | 5,42 $\pm$ 1,14 <sup>a</sup>    | 22,56 $\pm$ 2,60 <sup>b</sup>   |
|                  | GN        | 11,48 $\pm$ 1,02 <sup>a</sup>        | 27,23 $\pm$ 2,41 <sup>cd</sup>   | 39,77 $\pm$ 4,38 <sup>a</sup>     | 15,58 $\pm$ 2,38 <sup>ab</sup>  | 5,95 $\pm$ 1,54 <sup>a</sup>    | 21,52 $\pm$ 3,39 <sup>ab</sup>  |
|                  | GH        | 9,23 $\pm$ 0,88 <sup>a</sup>         | 13,83 $\pm$ 0,86 <sup>ab</sup>   | 41,23 $\pm$ 4,12 <sup>a</sup>     | 16,90 $\pm$ 1,33 <sup>b</sup>   | 5,99 $\pm$ 0,25 <sup>a</sup>    | 22,89 $\pm$ 1,35 <sup>b</sup>   |
|                  | KAS 30    | 10,50 $\pm$ 1,32 <sup>a</sup>        | 21,33 $\pm$ 3,92 <sup>bc</sup>   | 39,23 $\pm$ 2,75 <sup>a</sup>     | 18,97 $\pm$ 1,54 <sup>b</sup>   | 6,71 $\pm$ 2,80 <sup>a</sup>    | 25,67 $\pm$ 1,91 <sup>bc</sup>  |
|                  | KAS 60    | 10,65 $\pm$ 1,04 <sup>a</sup>        | 25,15 $\pm$ 2,63 <sup>cd</sup>   | 41,28 $\pm$ 2,24 <sup>a</sup>     | 24,31 $\pm$ 0,11 <sup>c</sup>   | 5,64 $\pm$ 1,35 <sup>a</sup>    | 29,95 $\pm$ 1,40 <sup>cd</sup>  |
|                  | KAS 120   | 10,61 $\pm$ 1,23 <sup>a</sup>        | 27,77 $\pm$ 3,47 <sup>cd</sup>   | 39,69 $\pm$ 1,98 <sup>a</sup>     | 30,65 $\pm$ 2,01 <sup>d</sup>   | 5,38 $\pm$ 1,37 <sup>a</sup>    | 36,03 $\pm$ 2,12 <sup>d</sup>   |
|                  | Kontrolle | 9,82 $\pm$ 1,94 <sup>a</sup>         | 10,50 $\pm$ 1,37 <sup>a</sup>    | 41,07 $\pm$ 3,39 <sup>a</sup>     | 12,22 $\pm$ 0,64 <sup>a</sup>   | 4,90 $\pm$ 1,19 <sup>a</sup>    | 17,12 $\pm$ 1,69 <sup>a</sup>   |
| Kalium           | AN        | 95,60 $\pm$ 3,80 <sup>b</sup>        | 250,89 $\pm$ 31,25 <sup>d</sup>  | 167,35 $\pm$ 13,25 <sup>a</sup>   | 19,78 $\pm$ 1,10 <sup>ab</sup>  | 41,76 $\pm$ 7,17 <sup>a</sup>   | 61,55 $\pm$ 7,94 <sup>ab</sup>  |
|                  | AH        | 66,37 $\pm$ 13,03 <sup>ab</sup>      | 85,83 $\pm$ 11,30 <sup>a</sup>   | 176,77 $\pm$ 15,12 <sup>a</sup>   | 20,31 $\pm$ 1,35 <sup>ab</sup>  | 39,00 $\pm$ 4,00 <sup>a</sup>   | 59,31 $\pm$ 5,04 <sup>ab</sup>  |
|                  | PN        | 94,25 $\pm$ 18,68 <sup>b</sup>       | 243,89 $\pm$ 33,20 <sup>d</sup>  | 147,55 $\pm$ 28,16 <sup>a</sup>   | 19,73 $\pm$ 3,88 <sup>ab</sup>  | 38,32 $\pm$ 7,84 <sup>a</sup>   | 58,05 $\pm$ 11,08 <sup>ab</sup> |
|                  | PH        | 70,63 $\pm$ 16,89 <sup>ab</sup>      | 80,57 $\pm$ 18,38 <sup>a</sup>   | 174,86 $\pm$ 6,84 <sup>a</sup>    | 19,96 $\pm$ 3,08 <sup>ab</sup>  | 39,53 $\pm$ 7,69 <sup>a</sup>   | 59,49 $\pm$ 10,44 <sup>ab</sup> |
|                  | FN        | 93,62 $\pm$ 16,76 <sup>b</sup>       | 232,48 $\pm$ 30,10 <sup>d</sup>  | 160,82 $\pm$ 12,27 <sup>a</sup>   | 20,70 $\pm$ 3,15 <sup>ab</sup>  | 37,66 $\pm$ 1,48 <sup>a</sup>   | 58,36 $\pm$ 3,07 <sup>ab</sup>  |
|                  | FH        | 74,18 $\pm$ 16,95 <sup>ab</sup>      | 99,02 $\pm$ 21,92 <sup>ab</sup>  | 170,45 $\pm$ 14,61 <sup>a</sup>   | 21,29 $\pm$ 2,70 <sup>ab</sup>  | 36,15 $\pm$ 7,30 <sup>a</sup>   | 57,44 $\pm$ 7,21 <sup>ab</sup>  |
|                  | GN        | 89,94 $\pm$ 6,74 <sup>ab</sup>       | 220,73 $\pm$ 26,21 <sup>d</sup>  | 159,68 $\pm$ 15,70 <sup>a</sup>   | 19,83 $\pm$ 3,16 <sup>ab</sup>  | 39,01 $\pm$ 6,84 <sup>a</sup>   | 58,8 $\pm$ 9,60 <sup>ab</sup>   |
|                  | GH        | 61,19 $\pm$ 6,05 <sup>a</sup>        | 91,24 $\pm$ 7,71 <sup>a</sup>    | 180,38 $\pm$ 15,78 <sup>a</sup>   | 21,63 $\pm$ 2,35 <sup>ab</sup>  | 39,89 $\pm$ 5,10 <sup>a</sup>   | 61,52 $\pm$ 6,90 <sup>ab</sup>  |
|                  | KAS 30    | 77,91 $\pm$ 12,90 <sup>ab</sup>      | 154,39 $\pm$ 39,90 <sup>bc</sup> | 165,07 $\pm$ 12,86 <sup>a</sup>   | 25,03 $\pm$ 1,47 <sup>b</sup>   | 56,59 $\pm$ 14,48 <sup>ab</sup> | 81,62 $\pm$ 13,79 <sup>bc</sup> |
|                  | KAS 60    | 78,16 $\pm$ 3,86 <sup>ab</sup>       | 193,11 $\pm$ 22,37 <sup>cd</sup> | 167,55 $\pm$ 17,11 <sup>a</sup>   | 33,99 $\pm$ 1,33 <sup>c</sup>   | 67,40 $\pm$ 3,60 <sup>b</sup>   | 101,39 $\pm$ 5,50 <sup>c</sup>  |
|                  | KAS 120   | 82,41 $\pm$ 8,08 <sup>ab</sup>       | 209,35 $\pm$ 26,91 <sup>cd</sup> | 156,45 $\pm$ 8,33 <sup>a</sup>    | 36,67 $\pm$ 1,71 <sup>d</sup>   | 104,19 $\pm$ 25,92 <sup>c</sup> | 140,86 $\pm$ 25,20 <sup>d</sup> |
|                  | Kontrolle | 64,33 $\pm$ 15,43 <sup>ab</sup>      | 69,10 $\pm$ 9,58 <sup>a</sup>    | 166,10 $\pm$ 7,60 <sup>a</sup>    | 15,87 $\pm$ 0,97 <sup>a</sup>   | 36,47 $\pm$ 6,39 <sup>a</sup>   | 52,34 $\pm$ 6,69 <sup>a</sup>   |

Tabelle A 7: Richtwerte für die Gehalte an Stickstoff, Phosphor und Kalium im Erntegut von Senf, Mais, Roggen und Weizen, verändert nach LfL (2013a) und Fritsch (2012)

| Kultur            | Erläuterung zum Erntepro-<br>dukt   | N                     | P   | K    |
|-------------------|-------------------------------------|-----------------------|-----|------|
|                   |                                     | g kg <sup>-1</sup> TM |     |      |
| Senf              | Ganzpflanze als Zwischen-<br>frucht | 17,5                  | 2,4 | 18,7 |
| Winterrog-<br>gen | Ganzpflanze zur Silierung           | 12,9                  | 2,5 | 11,4 |
| Mais              | Ganzpflanze zur Silierung           | 13,6                  | 2,5 | 13,3 |
| Weizen            | Korn (12 % Rohprotein)              | 21,0                  | 4,1 | 5,8  |
|                   | Stroh                               | 5,8                   | 1,5 | 13,5 |

## Danksagung

Ich möchte Prof. Dr. Dr. h.c. Frank Ellmer für die sehr gute Betreuung sowie für die zielgerichteten Ratschläge an den entscheidenden Stellen danken. Prof. Dr. Christof Engels und Dr. Wilfried Zorn danke ich für die Bereitschaft der Erstellung der Gutachten.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei Karen Sensel-Gunke, Kerstin Nielsen und Dr. Verena Wilken für die Beratung und tatkräftige Unterstützung bei der Planung und Durchführung aller Versuche. Nur durch gute Teamarbeit kann ein Projekt mit so vielen praktischen Versuchen gelingen.

Mein großer Dank gilt allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, die zum Gelingen der Versuche beigetragen haben. Dazu gehören unter anderem Steffi Tschuikowa, Anastasia Hübner, Volker Fiebrich und Heiko Vogel, Dr. Andreas Muskulus und sein Team von der landwirtschaftlichen Versuchsstation des IASP in Berge sowie Jörg Schmidt und seine Mitarbeiter von der Lehr- und Forschungsstation der Humboldt-Universität in Berlin-Dahlem. Bedanken möchte ich mich ebenfalls bei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Gemeinschaftslabors Analytik des Albrecht Daniel Thaer-Instituts für Agrar- und Gartenbauwissenschaften für die Durchführung der chemischen Analysen. Mein Dank gilt außerdem Dr. Stefanie Krück für die Beratung und Hilfe im Zusammenhang mit den Regenwurmversuchen.

Prof. Dr. Liliane Ruess und ihrem Team danke ich für die Bereitstellung der WhinRhizo-Software und für die Beratung im Umgang damit. In diesem Zusammenhang geht ein besonderer Dank auch an Dr. Peter Lentzsch vom ZALF Müncheberg für die Leihgabe der Rhizoboxen.

Dr. Thomas F. Döring danke ich für die Hilfe beim Anfertigen meiner ersten internationalen Veröffentlichungen.

Frau Dr. Kroschewski gilt mein Dank für die statistische Beratung bei der Versuchsauswertung.

Danken möchte ich auch Hendrikje Schreiter und Erik Baumann für Beratung und moralische Unterstützung sowie für das mehrfache Korrekturlesen.

Großer Dank gilt zudem meinen Eltern für ihre Unterstützung auf dem gesamten Weg bis hierher.



## Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel genutzt habe. Alle wörtlich und inhaltlich übernommenen Stellen habe ich als solche gekennzeichnet. Es hat keine Zusammenarbeit mit gewerblichen Promotionsberatern stattgefunden.

Ich habe die dem angestrebten Verfahren zugrunde liegende Promotionsordnung zur Kenntnis genommen und die Grundsätze der Humboldt-Universität zu Berlin zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis eingehalten.

Ich versichere außerdem, dass ich die vorliegende Dissertation nur in diesem und in keinem anderen Promotionsverfahren eingereicht habe und dass diesem Promotionsverfahren keine endgültig gescheiterten Promotionsverfahren vorausgegangen sind.